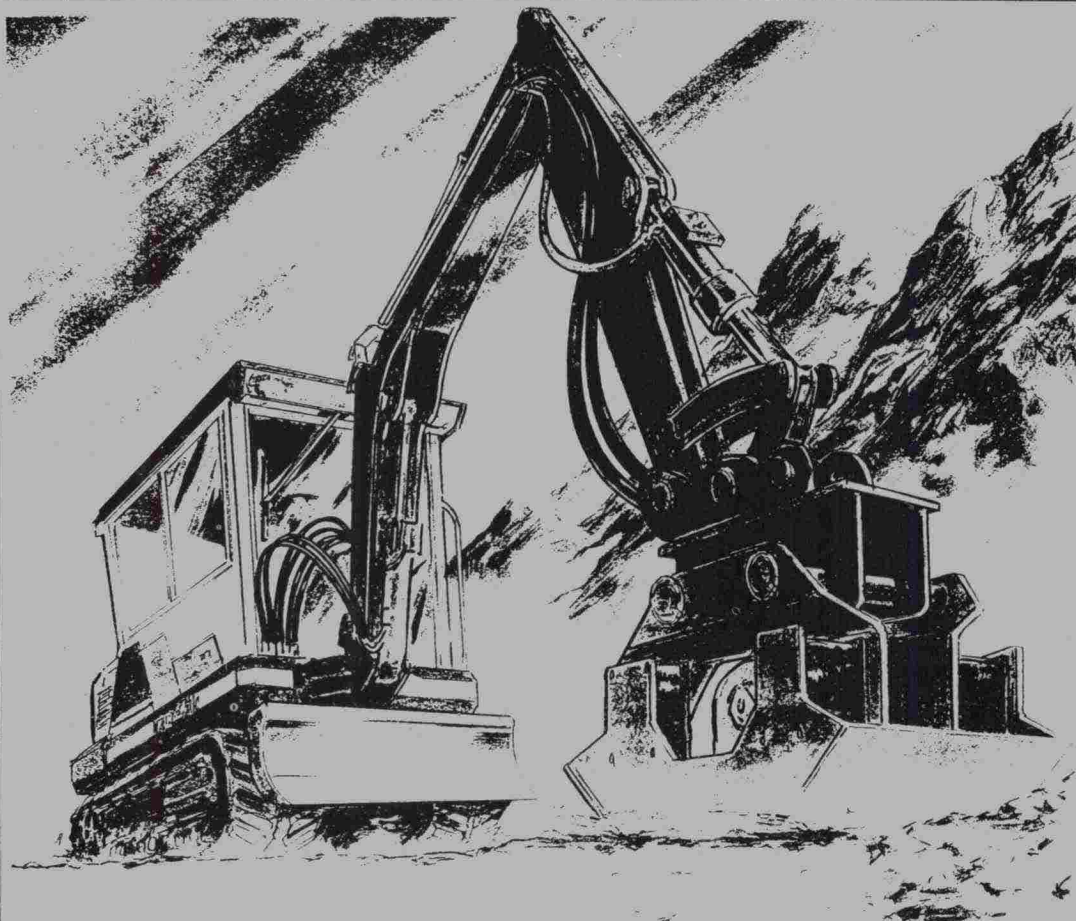


Tielaitos

Pohjaveden maatiivistesuojan tiivistäminen



**Tielaitoksen
selvityksiä**

31/1992

Helsinki 1992

**Helsingin
tuotantotekninen
kehitysyksikkö**

Tielaitoksen selvityksiä
31/1992

**Pohjaveden maatiivistesuojan
tiivistäminen**

Tielaitos
Helsingin tuotantotekninen
kehitysyksikkö

Helsinki 1992

2. painos

ISBN 951-47-6064-6

ISSN 0788-3722

TIEL 3200086

Valtion painatuskeskus

Pasilan VALTIMO

Helsinki 1992

Julkaisua myy

Tiehallitus, painotuotevarasto

Tielaitos

Tiehallitus

Opastinsilta 12 A

PL 33

00521 HELSINKI

Puh. vaihde (90) 148 721

TIIVISTELMÄ

Pohjavesisuojausta tarvitaan tien luiskassa pohjavesialueella estämään maantiesuolan ja säiliöauto-onnettomuuksissa maahan leviävien myrkyllisten aineiden pääsy pohjaveteen. Raportissa on esitelty tien kohdalla pohjavesien suojauksessa käytettäviä materiaaleja, maatiivistesuojan mitoitus ja käsitelty hienorakeisen maalajin tiivistämiseen vaikuttavia tekijöitä sekä tiivistämisen työkoneita. Lisäksi raportissa on käsitelty pohjavesisuojauksen laadunvalvontaa ja esitetty joitain suojauksen kehittämisideoita.

Maatiiviste rakennetaan yleensä tiivistämällä savista silttiä, silttimoreenia tai savea tieluiskaan 0,5 - 0,7 metrin kerros, joka peitetään multakerroksella. Maatiivisteen rakentamisen suurin ongelma on hienorakeisen maalajin tiivistäminen kaltevassa tieluiskassa. Tiivistämisen onnistumiseksi maalaji on tiivistettävä mieluummin hieman sen optimivesipitoisuuden alapuolella. Rakennetta ei voida tiivistää talvella eikä sateella.

Loivat keskiluiskat voidaan tiivistää telapuskutraktorilla tai jyrällä. Sorkkajyrä soveltuu hyvin savisen maakerroksen tiivistämiseen. Jyrkät luiskat voidaan tiivistää kaivukoneen kauhan tilalle asennetulla tärylevyllä. Tällöin voidaan käyttää myös jatkopuomia parantamaan työkonen ulottuvuutta.

Havaittujen puutteiden vuoksi luiskasuojauksen maamateriaalin, rakentamisen ja tiivistämisen laadunvalvontaa tulee parantaa. Käytettävän maalajin rakeisuus on selvitettävä ja rakenteen tiiviys tarkistettava tiivistämisen jälkeen.

Pohjaveden suojaamista tulisi edistää mm. seuraavasti:

- Kehitetään suojakerros, joka voidaan rakentaa tasaisena kerroksena tiepenkereen alle siten, ettei luiskan kaltevuus ole ongelma luiskan tiivistyksellekään.
- Selvitetään eri työkonien soveltuvuus ja tehokkuus maatiivistekerroksen rakentamiseen: työkonien sopiva paino, tiivistettävän kerroksen paksuus ja ylityskerrat.
- Kehitetään luiskasuojauksen laadunvalvontaa.

Pohjavesiä voidaan pyrkiä suojaamaan myös vaikuttamalla suolaukseen ja vaarallisten aineiden kuljetuksiin pohjavesialueilla.

ALKUSANAT

Tässä julkaisussa esitellään pohjavesien suojauksessa tien kohdalla käytettäviä maatiivisterakenteita ja esitetään menetelmiä maamateriaalin tiivistämiseksi. Julkaisu on tarkoitettu niille, jotka suunnittelevat tai toteuttavat maatiivisteisiä pohjavesisuojausjauksia.

Raportin on kirjoittanut DI Hannu Lappalainen Helsingin tuotantoteknisen kehitysyksikön tilauksesta. Päälähde on ollut Nina Raitasen diplomityö "Hienorakeisesta maalajista tieluiskaan tehdyn pohjavesisuojausjauksen tiivistäminen". Tielaitoksessa työtä ovat ohjanneet DI Tapani Angervuori ja rkm Heikki Tomi.

Koska tämä raportti on kooste kirjallisuusselvityksistä, edellyttävät pohjavesisuojausten tiivistämisestä esitetyt argumentit yleisempää tai ainakin työmaakohtaista tarkempaa ko. tekijöiden selvittämistä. Tätä julkaisua tullaan täydentämään pohjaveden laadunvalvontaohjeella, joka valmistunee vuoden 1993 alkuun mennessä.

Helsinki, kesäkuu 1992

Helsingin tuotantotekninen kehitysyksikkö

SISÄLTÖ:

TIIVISTELMÄ

ALKUSANAT

1. JOHDANTO	6
2. SUOJAUKSEN TARVE	6
3. SUOJAUKSEN RAKENNE	7
3.1 Suojauksen toimintaperiaate	7
3.2 Suojauksen rakenne	8
3.3 Vanhojen teiden luiskien suojaaminen	9
4. SUOJAUKSEN MITOITUS	11
5. SUOJAUSMATERIAALIT	15
5.1 Suojaverhous ja maatiivistekerros	15
5.2 Tiivistematot ja -kalvot	15
5.3 Maatiivisteen edut ja haitat	16
6. LASKUOJAT	17
7. RAKENTEISSA KÄYTETTÄVIEN MAALAJIEN TIIVISTETTÄ- VYYS	18
8. TIIVISTYMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	20
8.1 Yleistä	20
8.2. Frekvenssin ja amplitudin vaikutus tiivistymiseen	21
8.3. Jyräysnopeuden vaikutus tiivistymiseen	21
8.4. Kerrospaksuuden ja ylityskertojen vaikutus tiivisty- miseen	21
8.5. Alustan laadun vaikutus tiivistymiseen	22
8.6. Luiskan kaltevuuden vaikutus tiivistymiseen	22
8.7. Koetiivistys	23
9. TIIVISTÄMISEN TYÖKONEET	23
9.1. Yleistä	23
9.2. Kaivukoneet	23
9.3. Puskutraktorit	24
9.4. Tiivistyskoneet	25
9.4.1. Sorkkajyrä	25
9.4.2. Hinattava täryjyrä	26
9.4.3. 2-valssijyrä	26
9.4.4. Kumipyörävetoiset täryvalssijyrät	26
9.5 Tiivistystyökoneen valinta	27
10. SUOJAUSTEN LAADUNVALVONTA	28
10.1 Suojausten laatu	28
10.2. Maamateriaalin laadunvalvonta	28
10.3. Tiiviiden laadunvalvonta	30

10.3.1. Yleistä	30
10.3.2. Vesivolymetri	30
10.3.3. Radiometrinen tiiviyden mitta	31
10.3.4. Tiiviyden mitta jyrän tiiviysmittarilla	32
10.4. Rakentamisen laadunvalvonta	32
11. POHJAVEDEN SUOJAUKSEN KEHITTÄMISIDEOITA	33
12. LIITTEET	35
1. Suomessa ja Saksassa toteutettuja suojauksia	35

1 JOHDANTO

Pohjavesialueella tarvitaan tienluiskien suojausta säiliöauto-onnettomuuksien myrkkyyvuotojen ja tiesuolauksen aiheuttamien riskien ja haittojen takia.

Vuonna 1991 tielaitos julkaisi ohjeen "Pohjaveden suojaus tien kohdalla". Siinä esitettiin pohjavedensuojaus luiskassa tehtäväksi maatiivisteiden avulla. Ohjeessa määrättiin maa-aineksen laatuvaatimukset ja esitettiin suojarakenteiden poikkileikkaukset. Tässä ohjeessa on lisäksi esitetty miten materiaalin tiivistäminen tulisi tehdä sekä käsitelty hienorakeisen maalajin ja luiskan kaltevuuden aiheuttamia ongelmia eri työkoneiden käyttämiselle.

Tässä tiivistelmäraportissa esitetään pohjavesien suojauksessa tarvittavia luiskatiivisteiden rakenteita. Myös muita kuin tässä esitettyjä rakenteita voidaan käyttää, jos siitä asianomaisten (vesi- ja ympäristöpiiri, vesiottamon omistaja ja tiepiiri) kanssa sovitaan. Ohje koskee kaikkia uusia teitä ja vanhojen teiden parannuksia.

Luiskasuojauksen tarkoituksena on estää pohjavettä muodostavilla alueilla ja pohjavedenottamon suoja-alueilla haitallisten aineiden pääsy pohjaveteen noin 12 tuntia, jona aikana torjuntakalusto on kerännyt maastoon levinnyttä ainetta ja estänyt sitä leviämistä lisää sekä poistanut saastuneen maakerroksen.

2. SUOJAUKSEN TARVE

Pohjaveden suojauksen tarve määräytyy pohjavesialueiden luokituksen mukaan:

- I vedenhankinnalle tärkeä pohjavesialue
- II vedenhankintaan soveltuva pohjavesialue
- III muu pohjavesialue

Tärkeiksi pohjavesialueiksi (luokka I) luokitellaan alueet, joiden pohjavettä käytetään tai tullaan käyttämään 20-30 vuoden kuluessa. Näillä alueilla luiskasuojaus ulotetaan yleensä koko pohjavesialueelle.

Luokkien II ja III alueilla suojaaminen harkitaan tapauskohtaisesti. Suojausta puoltavia tekijöitä ovat vaihtoehtoisten pohjavesialueiden vähyys seudulla ja runsaat vaarallisten aineiden kuljetukset. Suojaustarpeesta pyydetään vesi- ja ympäristöpiirin lausunto.

Suojauksen rakenne mitoitetaan lähinnä vedenottamon suoja-alueen vyöhykkeiden perusteella:

- **Vedenottamoalueeksi** käsitellään vedenottamon välitön ympäristö, jonka laajuus määräytyy paikallisten olojen mukaan. Alueen rajojen tulisi kuitenkin ulottua vedenottamon kaivoista vähintään 20 metrin ja pohjaveden tulosuunnassa vähintään 30-50 metrin etäisyydelle. Suositeltava vedenottamoalueen

koko on 0.5 hehtaaria, eikä tälle alueelle rakenneta yleisiä teitä.

- **Lähisuojavyöhykkeen** avulla vedenottamo pyritään suojaamaan lähinnä hygieeniseltä saastumiselta. Vyöhykkeen rajat arvioidaan veden viipymän perusteella. Ohjeellisena veden viipymäärä on yleensä käytetty noin 50-60 vuorokautta lähisuojavyöhykkeen rajalta vedenottamolle. Hyvin vettä johtavilla alueilla vyöhyke voi ulottua jopa kilometrien päähän vedenottamosta. Näillä alueilla on ryhdyttävä erittäin vaativiin pohjaveden suojelutoimenpiteisiin.
- **Kaukosuojavyöhyke** on useimmiten sadan tai muutamien satojen hehtaarien kokoinen. Vyöhykkeellä pyritään estämään sellaisten vettä pilaavien aineiden, joita maaperän puhdistuskyky ei poista tai muuta vaarattomiksi, pääsy maahan ja pohjaveteen. Käytännössä tulisi kaukosuojavyöhykkeen käsittää koko pohjaveden muodostumisalue. Kaukosuojavyöhykkeellä on ryhdyttävä vaativiin pohjaveden suojelutoimiin.

Suojausta ei rakenneta, jos vettä johtavien maakerrosten päällä on esimerkiksi pohjavesialueen reunavyöhykkeellä huonosti vettä läpäisevä maakerros, joka täyttää suojaukselle asetetut vaatimukset. Luonnontilaisen, hienoainespitoisen maakerroksen paksuuden tulisi olla vähintään 2 metriä. Kuivakuorikerroksen halkeilu on estettävä verhouksella.

Vähäliikenteisillä teillä (KVL < 1500 ajon./vrk) suojauksen tarve arvioidaan erikseen. Jos tiellä on toistuvia myrkyllisten aineiden kuljetuksia, tien luiskat suojataan. Satunnaiset polttoainekuljetukset eivät yleensä edellytä suojaamista.

Alle 10 talouden kaivojen kohdalla harkitaan tapauskohtaisesti, pitääkö sivuojan luiska tiivistää.

3 SUOJAUKSEN RAKENNE

3.1 Suojauksen toimintaperiaate

Pohjaveden suojaus tehdään yleensä maatiivisteestä. Lisäsuojauksena käytetään tarvittaessa muovia tai bentoniittimattoa. Muovikalvon etuna on tiiviys, mutta haittana on sen repeytymis- ja puhkeamisvaara sekä korkea hinta että vaikea korjaaminen.

Suojaus rakennetaan kahtena kerroksena: maatiivisteinä ja suojaverhouksena. Suojaus toimii seuraavasti:

- Säiliöauton jouduttua luiskaan auto uppoaa suojaverhoukseen ja tiivistekerros jää vahingoittumatta. Tiivistekerroksen tulee estää vaarallisten aineiden pääsy pohjaveteen vähintään 12 tunnin ajan, kunnes torjuntakalusto on ehtinyt padota ojan ja poistaa likaantuneen maan. Vähäisissä onnettomuuksissa

sisä luiskaan valuva myrkky imeytyy suojakerrokseen ja tiivistekerroksen yläosaan, josta se haihtuu tai hajoaa. Paksu tiivistemaa estää aineen pääsyn suojauksen läpi.

- Tiesuolasta pääosa virtaa sulamisvesien mukana pois. Osa suolasta imeytyy tiivisteeseen ja pääsee pieninä pitoisuuksina suojauksen läpi. Suurin osa talvisaikaan käytetystä suolasta varastoituu lumikinoksiin alle 3 metrin etäisyydelle tien reunasta.
- Suojatulta alueelta pintavedet johdetaan maa- tai muovitiivisteistä ojaan tai putkea pitkin turvalliseen purkupaikkaan, joita ovat tiiviit moreenialueet, savikot sekä suojattavan pohjavesialueen ulkopuoliset alueet (joet, järvet, suot jne.). Vilkasliikenteiltä teiltä vedet johdetaan öljynerotusaltaiden kautta ennen maahan imeyttämistä tai purkamista arkaan vesistöön. Pohjavesialueen painanteista vesi pumpataan alueen ulkopuolelle.

3.2 Suojauksen rakenne

Vilkasliikenteisillä teillä (KVL > 3000 ajon./vrk) suojauksen vaatimustaso valitaan seuraavasti:

1. Lähisuojavyöhykkeellä	erittäin vaativa
2. Kaukosuojavyöhykkeellä	vaativa
3. Muulla osalla pohjavesialuetta	perussuojaus
4. Pohjavesialueet, joilla ei ole suunniteltu ottamoa	perussuojaus (jos suojataan)

Luokkaa nostetaan yhdellä kohdissa, joissa maaperä on erittäin vettäläpäisevää (0.074 mm hienoainesta alla 8 %).

Luokkaa lasketaan yhdellä, jos tie ei ole vilkasliikenteinen (KVL < 3000 ajon./vrk) ja vaarallisten aineiden kuljetuksia on vähän tai jos vedenottamon ottama vesimäärä on alle 250 m³/vrk. Tapauskohtaisesti voidaan harkita, voidaanko perussuojaus jättää tällä perusteella tekemättä tapauksissa 3. ja 4.

Vanhojen vedenottamoiden suojavyöhykkeiden rajat tulisi tarkistaa nykyisten suositusten mukaisiksi. Sellaisten pohjavesialueiden kohdalla, joissa ei ole vedenottamoa, suojauksen tarve harkitaan tapauskohtaisesti.

Pohjaveden suojeluvyöhykkeillä käytetään suojaustarpeen mukaan erilaisia maalajeja ja kerrospaksuuksia. Käytetyt maalajit ja kerrospaksuudet ovat kuvan 1 mukaisia.

Louhepenkereelle rakennettujen teiden pohjaveden suojauksessa on käytettävä louheen ja suojausmateriaalin välissä kuitukangasta, joka estää suojausmateriaalin valumisen louheen tyhjätiloihin.

3.3 Vanhojen teiden luiskien suojaaminen

Vanhoilla teillä luiskien suojaaminen tehdään seuraavissa tapauksissa:

- aina raskaan parantamisen yhteydessä
- riskialttiissa kohdissa ottamojen lähellä, kun pohjaveden päällä oleva kerros on ohut ja vettäläpäisevä sekä myrkyllisten aineiden kuljettaminen on yleistä
- laajemman pohjavesien suojaussuunnitelman osana
- kun läheiseltä maarakennustyömaalta saadaan luiskatäyteeksi sopivaa materiaalia

Vanhoilla teillä paksun ja leveän luiskasuojauksen tekeminen on usein vaikeaa. Tilaa on vähän, luiskat ovat liian jyrkkiä luiskatiivistäjien pysymisen kannalta ja massojen käsittely liikenteen seassa on kallista ja liikenteelle vaarallista. Suojaus kannattaa tehdä uudelleenpäälystämisen tai muun parantamisen yhteydessä.

Vanhoilla teillä sovelletaan mahdollisuuksien mukaan samoja rakenteita kuin uusilla teillä.

Seuraavat poikkeukset tulevat kuitenkin esimerkiksi kysymykseen:

- Sisäluiskan yläosan tiivistematto korvataan bitumiemulsio-ruiskutuksella, jos maton käyttö on liikennemerkkien tai muun syyn vuoksi vaikeaa.
- 0.8 metriä paksu rakenne (kuva 1, kohta 2.) voidaan korvata 0.5 metriä paksulla rakenteella (kuva 1, kohta 3.) tai 0.4 metriä paksulla rakenteella (kuva 1, kohta 4.), jos paksun suojakerroksen tekeminen on hyvin vaikeaa.
- Perussuojaus voidaan korvata kevyellä suojauksella (0.4 metriä paksulla rakenteella), kun pohjamaassa on vähintään 8 % hienoaainesta (0.074 mm).
- Suojauksen leveys voidaan valita kuvan 4 mukaan.
- Suojaverhouksen paksuudeksi riittää 0.1 - 0.2 m kaikissa rakenteissa, jos paksu suojaus ei mahdu.

Kevyt luiskasuojaus ei anna kaikissa tapauksissa täyttä suojaa säiliöauto-onnettomuuksien varalta kapeutensa ja ohuutensa takia. Suurin osa suola-valumista voidaan kuitenkin ohjata pintavesien mukana pois. Kevyt luiskasuojaus ei kestä kunnolla kunnossapitokoneiden liikkumista, kun luiska on jyrkkä.

Vaihtoehtoista oikeanpuoleista käytetään silloin, kun tilaa tai tiivistämaata on vähän.

1. Erittäin vaativa suojaus vedenottamon lähisuojavaohyökköellä



0,3 m suojaverhousta
0,7 m erikoismaatiivistettä

1 m



0,2 m suojaverhousta
0,4 m maatiivistettä +
muovikalvo

0,6 m

Sisäluiskan yläosa tiivistetään bentoniittimatolla tms.

2. Vaativa suojaus vedenottamon kaukosuojavaohyökköellä.



0,3 m suojaverhousta
0,7 m maatiivistettä

1 m

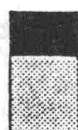


0,3 m suojaverhousta
0,5 m erikoismaatiivis-
tettä

0,8 m

Sisäluiskan yläosa tiivistetään bituminoidulla kuitukankaalla tms. Vaihtoehtona 0,8 m suojaukselle voidaan käyttää kohdan 1 0,6 m suojausta.

3. Perussuojaus muulla pohjavesialueella



0,2 m suojaverhousta
0,3 m maatiivistettä (ei savista)

0,4 m



0,2 m suojaverhousta
0,3 m maatiivistettä
bitumoitu kuitukangas tai ohut

0,5 m muovi

4. Kevyt suojaus vanhoilla teillä



0,2 m suojaverhousta
0,3 m maatiivistettä (ei savista)

0,4 m

Sisäluiskan yläosa tiivistetään sorakulutuskermosmateriaalilla

Jos maaperä on erittäin läpäisevää, nostetaan suojauksen luokkaa yhdellä. Luokkaa lasketaan yhdellä, jos tie ei ole vilkasliikenteinen ($KVL < 3000$ ajon/d), ja vaarallisten aineiden kuljetuksia on vähän. Luokkaa lasketaan myös, jos vedenottamon ottama vesimäärä on alle $250 \text{ m}^3/\text{d}$

4 SUOJAUKSEN MITOITUS

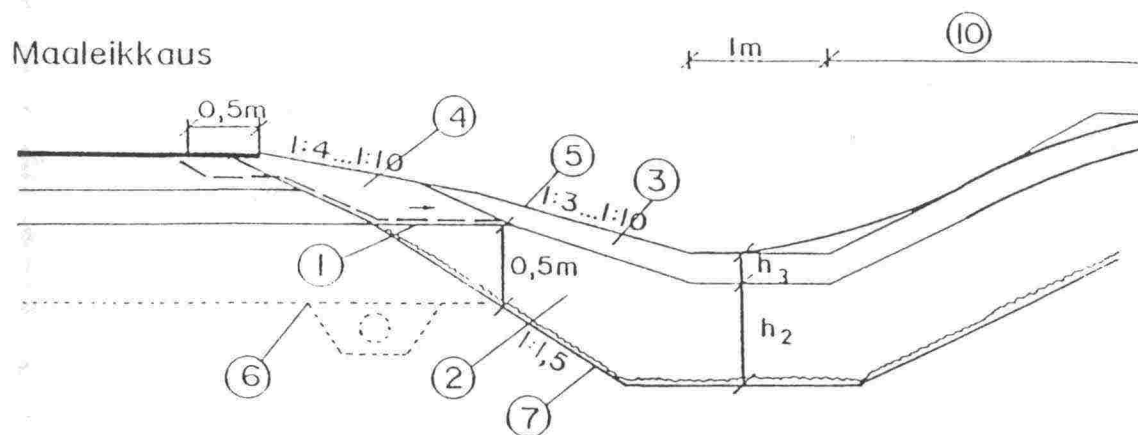
Mallipoikkileikkaukset luiskasuojauksen rakenteesta on esitetty kuvissa 2 ja 3.

Uudet tiet, vaativa suojaus (kuva 2)

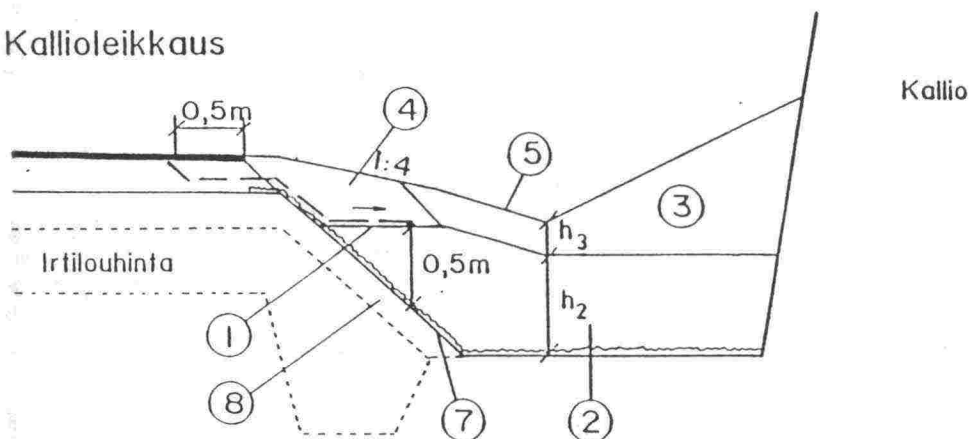
1. Bentoniittimatto, kuitukangas tms.
2. Maatiiviste. Nimellispaksuus h_2 on 0,7 m. Sisäluiskan yläosassa nimellispaksuus saa alittua, mutta ei alle 0,5 m etäisyydellä pohjasta.
3. Suojaverhous h_3 on 0,3 m. Nimellispaksuus saa alittua, jos tiivistemaa on vastaavasti paksumpi.
4. Soratien kulutuskerrosmursketta
5. Nurmetus
6. Routimattomalla maalla rakenne on paksumpi ja se kuivatetaan tarvittaessa salaojalla.
7. Kuitukangas, jos alustana on louhe.
8. Louheen yläpinta kiillataan ja tasataan.
9. Kaidepylväs painetaan maahan kaivamatta. Ennen maahan painamista bentoniittimatto tai bitumoitu kangas paljastetaan. Pylvään tekemä reikä paikataan bentoniitti jauheella tai bitumilla.
10. Suojauksen leveys määritetään kuvien 4 ja 5 avulla.

Vanhat tiet, vaativa suojaus (kuva 3)

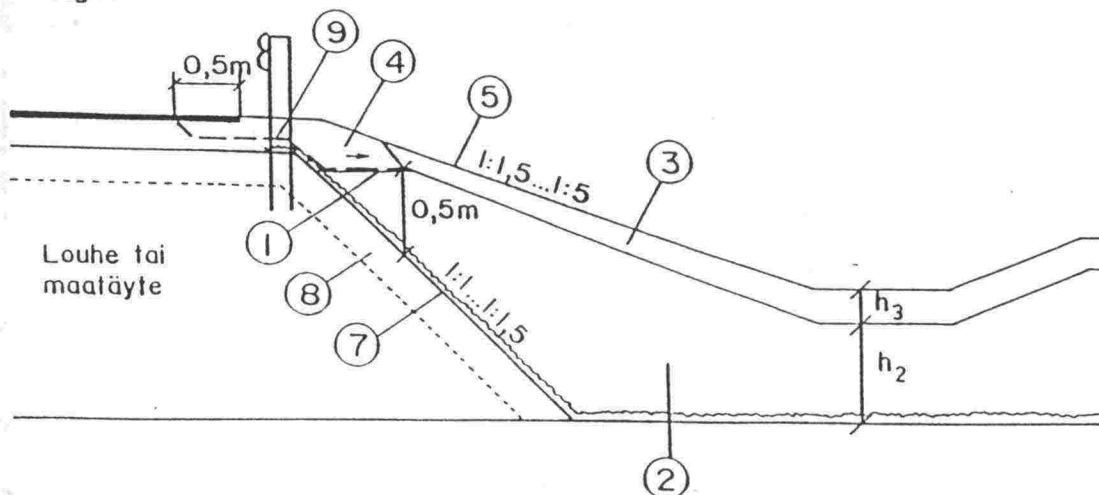
1. Luiskaa loivennetaan ojaa madaltamalla.
2. Tiivistemaata laitetaan pois kaivetun pohjamaan tilalle. Tiivisteiden päälle tulee suojaverhous ja nurmetus.
3. Mahdollinen tiivistematto asennetaan sisäluiskan yläosaan ja muovikalvomaatiivisteiden alle.
4. Sisäluiskan yläosa ja ulkoluiskan alaosa loivennetaan leikkausta leventämällä.
5. Tiivistemaata laitetaan pois kaivetun pohjamaan tilalle. Tiivisteiden päälle tulee suojaverhous ja nurmetus.
6. Mahdollinen tiivistematto asennetaan sisäluiskan yläosaan ja muovikalvomaatiivisteiden alle.
7. Luiskasta leikataan 0,3 m kerros. Kivettömälle pinnalle asennetaan bitumoitu kuitukangas, 0,25 m mursketta ja 0,05 m bitumilla tai bitumiemulsiolla sidottua päällystettä.
8. Kallion halkeamat tukitaan esim. ruiskubetonilla.
9. Maatiiviste tehdään vanhan luiskan päälle.
10. Pintavedet kerätään ojaan, jossa on liettymisvara.
11. Pintavedet kerätään salaojaan. Ojaan asetetaan putken alle ja sivuille muovi. Putki ympäröidään soralla.



Kallioleikkaus



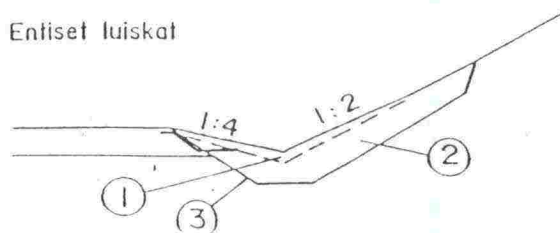
Penger



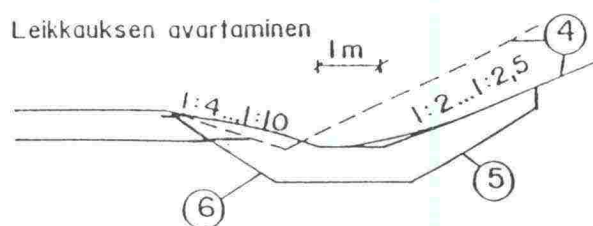
Kuva 2. Uuden tien vaativan suojauksen poikkileikkaukset /3/.

Maaleikkaus

Entiset luiskat



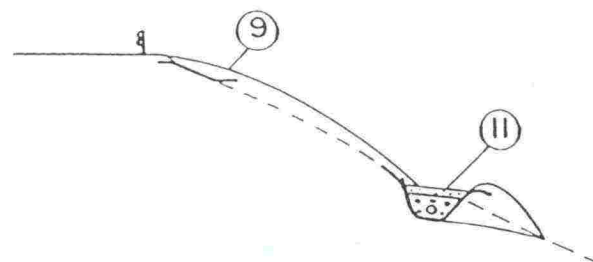
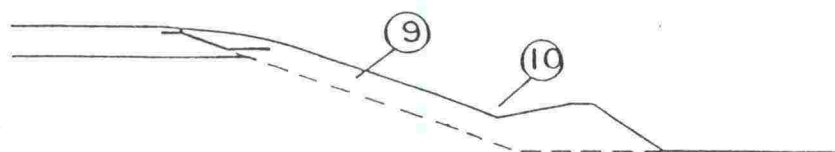
Leikkauksen avartaminen



Kallioleikkaus



Penger

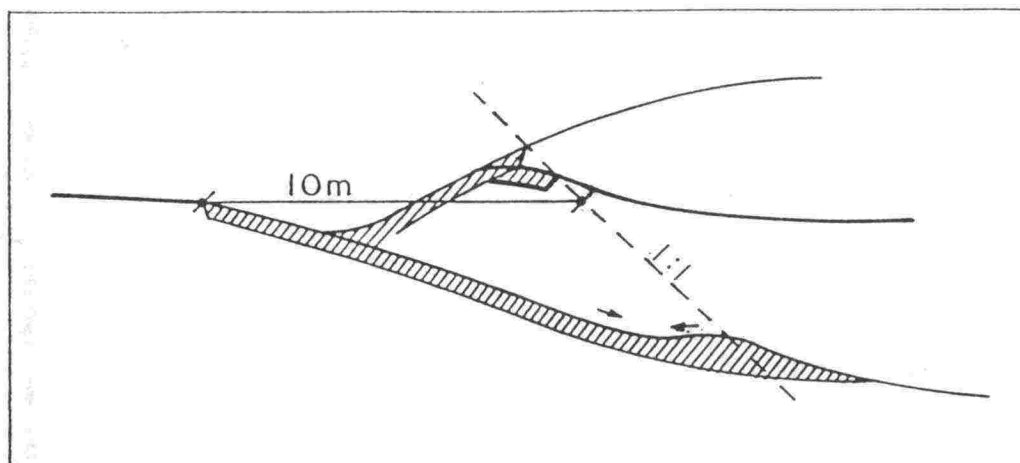


Kuva 3. Vanhan tien vaativan suojauksen poikkileikkaukset /3/.

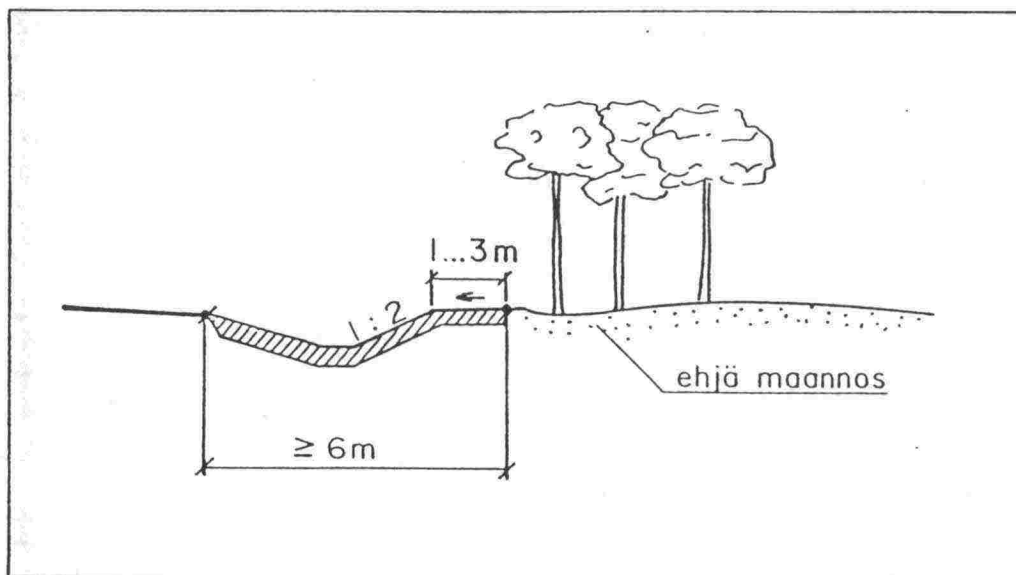
Suojauksen leveys

Suojauksen leveys saadaan kuvasta 4. Jos kuvan 4 mukainen luiskasuojaus edellyttäisi maiseman kannalta merkittävän metsän hävittämistä, voidaan käyttää kuvan 5 mukaista kapeampaa suojausta. Kapeaa suojausta voidaan käyttää myös kevyen- ja perussuojauksen yhteydessä. Leikkauksessa suojan tulisi ulottua 2 metriä ojan pohjaa ylemmäksi.

Säiliöauton suistuminen tieltä voidaan estää vähintään 0,8 metrin korkuisella kaiteella. Säiliöauton kaatumisriskiä voidaan pienentää loiventamalla sisäluis-
kan yläosaa ja ulkoluis-
kan alaosaa.



Kuva 4. Luiskasuojauksen leveyden määrittäminen maaleikkauksessa, 0-tasauksessa ja penkereellä /3/.



Kuva 5. Metsän säästämiseksi tai muun syyn vuoksi kavennettu luiskasuojaus /3/.

5 SUOJAUSMATERIAALIT

5.1 Suojaverhous ja maatiivistekerros

Erikoismaatiivisteeksi kelpaavat siltti, silttimoreeni ja savi, joiden

- hienoainespitoisuus (0,074 mm) on vähintään 70 %, ja tiiviyssaste rakenteessa 85 % proctor-tiiviydestä sekä
- hienoainespitoisuus (0,074 mm) on vähintään 60 %, ja tiiviyssaste rakenteessa 90 % proctor-tiiviydestä
- tai muu kivennäismaalaji, jonka vedenjohtavuus laboratoriossa 90% tiiviyssasteessa on enintään $5 \cdot 10^{-8}$ m/s (0,43 cm/d). Tällöin ko. maan vedenjohtavuus maastossa huolellisen tiivistämisen jälkeen on alle $5 \cdot 10^{-6}$ m/s (1,88 cm/h), mikä on tavoitteena. Lisäksi tiivistemaan tulee olla tasalaatuista, eikä siinä saa olla puhtaita hiekkakerroksia tai kasvinjätteitä.

Riittävä tiivistäminen on tarpeen, sillä tiivistetyssä maassa rakeiden väliin ei jää rakoja, joista vesi kulkeutuu pohjamaahan. Huolellinen tiivistäminen vähentää myös eroosiota ja kuivumishalkeamien syntyä.

Tavalliseksi maatiivisteeksi kelpaa silttimoreeni, jonka hienoainespitoisuus on < 50%.

Suojaverhoukseen sopivia materiaaleja ovat kivettömät sora-, hiekka- ja silttimoreenit. Suojakerroksen pintaosissa tulee olla kasvualustana humusta. Suojaverhouksen tehtävänä on suojata maatiivistettä kuormilta, eroosiolta ja kuivumiselta sekä toimia kasvualustana.

Suojaverhouksen materiaali voi olla samaa kuin tiivistekerroksessa, jos se täyttää molempien laatuvaatimukset. Jos veden virtausnopeus on suuri, ojan pohja tulee kivetä vesieroosion estämiseksi.

Taulukko 1. Vedenläpäisevyyskertoimien arvoja /1/.

Maalaji	K-arvo (m/s)	
Si	$10^{-1} \dots 10^{-2}$	10 cm/s - 1 cm/s
Hk	$10^{-2} \dots 10^{-6}$	1 cm/s - 8,64 cm/h
Karkea Si	$10^{-4} \dots 10^{-8}$	36 cm/h - 0,20 cm/2d
Hieno Si	$10^{-6} \dots 10^{-10}$	64 cm/h - 0.50 cm/3d
Savi	$10^{-10} \dots 10^{-12}$	0,50 cm/3d - 0,10 cm/d

5.2 Tiivistematot ja -kalvot

Tien sisäluiska ja päällysteen reuna tiivistetään erittäin vaativassa suojauksessa bentoniittimatolla. Siinä on kahden kuitukankaan välissä 8 - 10 mm

kerros aktivoitua bentoniittisavea. Savi turpoaa kastuessaan kolmikertaiseen tilavuuteen. Matto ei saa kastua ennen sen asentamista. Saumat tehdään limittämällä ne 300 mm ja tiivistämällä ne bentoniittijauheella (1 kg/m). bentoniittimatto kestää pientä venymistä repeämättä. Pienet bentoniittikerrokseen tehdyt reiät korjautuvat itsestään.

Bentoniittimaton sijasta voidaan muissa suojauksissa käyttää muutakin venyvää, karkeaa kiviainesta ja kemikaaleja kestäväää ja korjaamiskelpoista materiaalia, kuten kuitukangaspohjainen bituminen matto tai bituminoitu kuitukangas. Neulattuun, päältä nukkapintaiseen II-luokan kuitukankaaseen ruiskutetaan 1,3 kg/m² bitumiemulsiota (BE-0) tai lämmintä (140 - 150 asteista) puhallettua bitumia. Sisäluiskan tiivistematon leveydeksi tulee 2,5 tai 1,9 metriä, kun sisäluiskan yläosan kaltevuus on 1:3 tai 1:5. Tiivistematto tulee 0,5 metrin leveydeltä päällysteen alle. Maton ja päällysteen väliin voidaan levittää mursketta 0 - 0,25 metrin kerros. Maton alusta on tasoitettava, etteivät kivet tunkeudu siihen. Bentoniitti kastellaan useita kertoja ennen päällystämistä.

Tiivistekalvona voidaan käyttää muovia, kun peitepaksuus on vähintään 0,5 metriä. Yleensä kannattaa käyttää suurempaa peitepaksuutta, jolloin tien laitteita ei tarvitse asentaa kalvon läpi. Suositeltava peitepaksuus on 1 metri. Kaiteiden ja liikennemerkkien upotussyvyys on yleensä 1 metri, valaisinpylväiden 2 metriä ja kaivojen 2 - 3 metriä.

Tiivistemuovin vähimmäispaksuus on 1 mm. Saumojen hitsaus voi vaatia paksumman kalvon. HD-polyeteeni on suositeltavin kalvomateriaali.

Tiivistemuovin liitokset tehdään vesitiiviiksi. Orsivesipinnan yläpuolella voidaan käyttää myös pelkkää limitystä, kun kalvon kaltevuus on 1:1,5 tai jyrkempi. Yläpuolisen maakerroksen liukumisvaaran vuoksi kalvon kaltevuus ei saisi olla välillä 1:3 ... 3:1, eikä maanpinnan kaltevuus jyrkempi kuin 1:4. Luistamisvaaraa voidaan vähentää käyttämällä karkeutettua kalvoa. Jyrkkää luiskaa voidaan sitoa yläreunasta ankkuroidulla lujiteverkolla. Kalvon reunat nostetaan selvästi sivuojan pohjaa tai mahdollista orsivedenpintaa ylemmäksi.

Tiivistemuovin päälle asennetaan normaalisti kuitukangas kalvon suojaksi ja lisäämään kitkaa. Muovikalvon alla käytetään hiekasta tehtyä suojakerrosta, jos alapuolisen maan pinnassa on teräviä kiviä.

Perussuojauksen rakennusmuoviksi kelpaa vähintään 0,3 mm paksu LD- tai HD-polyeteenikalvo. Sen tarkoituksena on vähentää maatiivisteen kuivumista. Saumoista ei tarvitse tehdä vesitiiviitä.

5.3 Maatiivisteen edut ja haitat

Luiskien suojaus voidaan toteuttaa maatiivisteellä, muovikalvolla, bentoniittimattolla tai näiden yhdistelmillä.

Maatiivisteen etuja ovat:

- Maatiiviste on huokea ratkaisu.
- Muovikalvon hinnalla saadaan paksu maatiiviste.

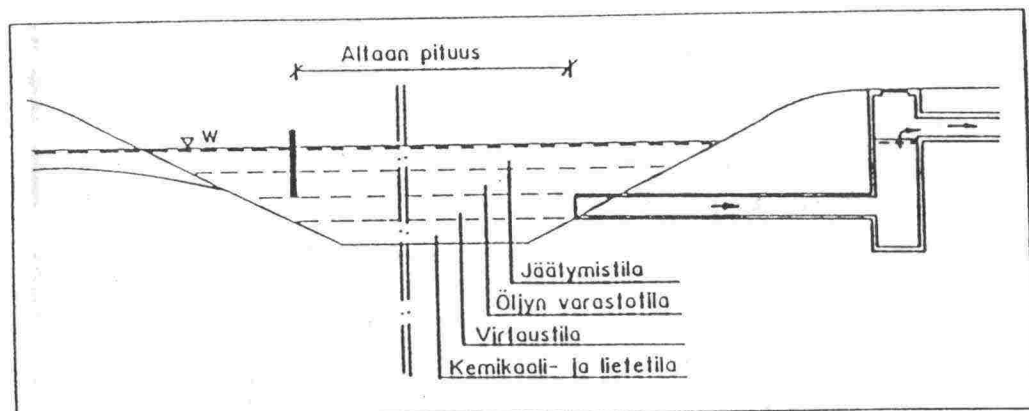
- Tietyömaalla on usein tiivisteeksi kelpaavaa maainesta saatavilla.
- Riittävän paksua maakerrosta käytettäessä suojauksen rikkoutumisvaara onnettomuuksien yhteydessä vähenee.
- Rakenne on korjauskelpoinen: valaisinpylväiden ja sähköjohdotjen asennuksen yhteydessä pois kaivettu maamateriaali voidaan asettaa takaisin paikoilleen.
- Maatiiviste on pitkäikäinen suoja-aine, joka ei rikkoudu alusrakenteen painuessa tai mekaanisessa rasituksessa.
- Luiskan suojaaminen maatiivisteellä on työteknisesti helpompaa kuin muovilla.
- Työ- ja ainekustannuksista tuleva hyöty jää paikkakunnalle.
- Suojauksesta ei ole esteettistä haittaa.

Maatiivisteen haittoja ovat:

- Sopivan maamateriaalin puuttuessa lähistöltä kuljetuskustannukset saattavat olla suuret.
- Maatiiviste saattaa halkeilla kuivuessaan.
- Maatiiviste routii.
- Onnettomuuden tapahduttua saastuneet maamassat ovat ongelmajätettä.
- Maamassan tiivistäminen kaltevalla pinnalla on vaikeaa.
- Tien rakennekerrosten ja päällysteen liittäminen suojauskerrokseen on vaikeaa.

6 LASKUOJAT

Luiskasuojaukselta pintavedet johdetaan maa- tai muovitiivisteistä ojaa tai putkea pitkin turvalliseen purkupaikkaan. Tällaisia ovat tiiviit moreenialueet, savikot sekä suojattavan pohjavesialueen ulkopuoliset joet, järvet ja suot. Vesi voidaan imeyttää maahan alueella, joka ei sovellu vedenottoon. Vilkasliikenteisiltä teiltä kertyneet pintavedet johdetaan öljyerotusaltaan kautta ennen imeyttämistä tai erityisen arkaan vesistöön purkausta. Pohjavesialueella olevista painanteista vesi joudutaan joskus pumppaamaan alueen ulkopuolelle.



Kuva 6. Öljynerotusallas, esimerkki mitoituksesta /3/.

Jäätymistilan paksuus on 0.6 - 1.0 m. Öljyn (ym. kevyiden aineiden) varastotilan tilavuudeksi valitaan usein 20 m^3 , mikä riittää säiliöauto-onnettomuudessa. Lietteen (ym. raskaiden aineiden) varastotilan tilavuus voi olla $10 - 30 \text{ m}^3$. Virtaustilan virtaamissuuntaa vastaan kohtisuora poikkileikkaus ($A = \text{leveys} \times \text{korkeus}$) valitaan siten, että keskimääräiseksi virtausnopeudeksi (v) tulee enintään 54 m/h ($A > Q/v$). Mitoitusvirtaamaksi (Q) valitaan kerran 20 vuodessa toistuva kevätylivaluma. Lisäksi altaan pituus (l) mitoitaan siten, että veden viipymisajaksi (t) altaassa tulee vähintään 9 minuuttia eli 0.15 tuntia ($l > t \times v$). Vesiviranomaisten kanssa voidaan sopia muistakin mitoitusperusteista; esimerkiksi virtausnopeudeksi valitaan 75 m/h ja viipymäksi 0.25 tuntia.

Öljynerotusaltaan pohja tiivistetään kuten tien luiskat vaativassa suojauksessa.

7 RAKENTEISSA KÄYTETTÄVIEN MAALAJIEN TIIVISTETTÄVYYS

Luiskasuojauksen maatiivisteessä käytetään runsaasti hienoainesta sisältäviä maalajeja: savea, silttiä ja silttimoreenia. Maalajien runsas hienoainespitoisuus mahdollistaa tiivistettävän kerroksen alhaisen vedenläpäisevyyden, mikä on tavoitteena, mutta samalla maalajit ovat vaikeasti käsiteltäviä ja tiivistettäviä.

Hienorakeisten maalajien tiivistettävyyden ja käsiteltävyys riippuvat erityisesti maalajin kuivairtoteiheydestä, optimivesipitoisuudesta, plastisuudesta ja sensitiivisyydestä.

Kuivairtoteiheyden maksimilla tarkoitetaan suurinta kuivairtoteiheyttä, johon tietty maalaji tietyllä standardimenetelmällä voidaan sulloa. Kuivairtoteiheyden maksimi saavutetaan vesipitoisuuden arvolla, jota nimitetään optimivesipitoisuudeksi. Kuivairtoteiheyden määrittäminen tapahtuu proctor-kokeella. Optimivesipitoisuus on karkearakeisilla maalajeilla pienempi kuin hienorakeisilla, sillä hiukkaskoon pienetessä rakeiden kokonaispinta-ala kasvaa. Samalla kasvaa myös maksimitiiviyden aikaansaamiseksi tarvittavan veden määrä. Tiivistettäessä voidaan kastelulla huolehtia siitä, että vesipitoisuus on oikea.

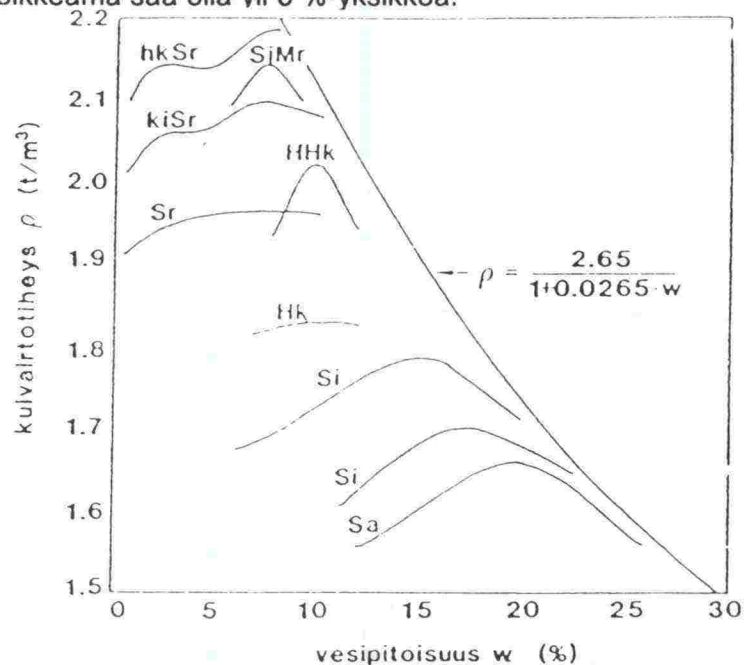
Hienorakeista maata tiivistettäessä, ja vesipitoisuuden ollessa yli optimin, saattaa syntyä tilanne, jossa tiivistäminen tietyn tiiviyden jälkeen aiheuttaa lujouden pientymistä ja maan velliintymistä. Tämä johtuu siitä, että huokostilan pientyessä huokokset täyttyvät kokonaan vedellä. Tiivistettäessä olisikin varmempaa pysyä hieman optimivesipitoisuuden alapuolella, jotta ongelmilta voidaan paremmin välttää.

Hienorakeisten maalajien tiivistyksessä kastelu tulee harvoin kysymykseen, sillä näiden maalajien luonnollinen vesipitoisuus on usein suurempi kuin optimivesipitoisuus. Lisäksi kasteluvesi synnyttää luiskassa puroja ja kuljettaa tiivistysmateriaalia mukanaan alas.

Taulukko 2. Maalajien luonnolliset- ja optimivesipitoisuudet /1/.

Maalaji	Luonnollinen vesipitoisuus (%)	Optimivesipitoisuus (%)
Sr, SrMr	5 - 15	5 - 15
HkMr, SiMr	10 - 20	5 - 15
Hk	5 - 25	5 - 15
Si	15 - 45	15 - 25
Sa	35 - 110	20 - 30

Koheesiomaan (savi) tiivistyksessä, tiiviysvaatimuksen ollessa yli 95 % proctor-tiiviydestä ei luonnollisen- ja optimivesipitoisuuden ero saa olla yli 3 %-yksikköä. Vaatimuksen ollessa yli 90 %, kuten luiskasuojauksissa on, ei em. poikkeama saa olla yli 6 %-yksikköä.



Kuva 7. Eri maalajien kuivairtitiheyden ja vesipitoisuuden välinen riippuvuus parannetussa proctor-kokeessa /1/.

Luiskasuojauksiin käytettävistä maalajeista silttimoreeni on herkkä vesipitoisuuden muutoksille, mutta sitä on helppo tiivistää. Savi ja siltti eivät puolestaan ole yhtä herkkiä vesipitoisuuksien muutoksille, mutta niiden tiivistäminen on vaikeampaa ja vaadittava työmäärä on silttimoreenia suurempi.

On huomattava, että saven tiivistäminen onnistuu vain saven ollessa plastista. Plastinen savi tarttuu kuitenkin herkästi esimerkiksi kuljetusauton lavaan tai kaivukoneen kauhaan. Tiivistyspaikalle olisikin edullisinta tuoda kuivakuorisavea, joka kasteltaisiin plastiseksi vasta ennen tiivistämistä.

Maatiivisteessä käytettävät maalajit ovat suuren hienoainespitoisuutensa vuoksi vaikeita käsitellä. Maalajit ovat huonosti kaivettavia, tiivistettäviä, kuljettavia ja läjitettäviä. Sensitiivisyytensä vuoksi koheesiomaat saattavat menettää tiivistettäessä huomattavasti lujuuttaan. Tämä lujuus palautuu ainkin osittain myöhemmin.

Maalajit tulee tiivistää lähellä optimivesipitoisuutta. Koska hienorakeisten maalajien luonnollinen vesipitoisuus on hyvin suuri, pienikin lisäys vesipitoisuuteen voi vaikeuttaa tiivistämistä ja muuttaa maalajin juoksevaksi.

Lämpötilan laskiessa veden viskositeetti kasvaa varsinkin lähellä 0°C. Tämä vaikeuttaa maan tiivistymistä. Veden jäädyttyä muodostuu maarakeiden pinnalle jääkerros, jolloin rakeiden siirtyminen toistensa suhteen ei ole enää mahdollista. Jos silloin tiivistetään, tulee rakenteesta löyhäkö mururakenne.

Sateella hienorakeisen maalajin pinta muuttuu liukkaaksi ja koneiden työskentely pinnalla vaikeutuu. Toisaalta savipitoinen maa saattaa tarttua koneen teloihin ja tärylevyyn. Hienorakeisten maamassojen käsittelyä tulisikin välttää sateella ja silloin, kun maamassojen vettyminen on mahdollista. Sälle alttiita massoja ei myöskään saa jättää tiivistämättä työpäivän päättyessä.

Yli 90% proctor-tiiviyteen voidaan päästä, jos lämpötila on yli -20°C ja tiivistys tehdään kahden tunnin kuluessa levityksestä. Silloin materiaalin vesipitoisuuden tulisi olla alle 3,5%, mikä on hienorakeisilla maalajeilla lähes mahdotonta. Tiivistystyö tulisikin tehdä kesäaikana. Silloin olisi kuitenkin huolehdittava siitä, että maa-aines ei pääse liiksi kuivumaan kosteuden haihtuessa.

8 TIIVISTYMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

8.1 Yleistä

Koneen paino välittyy maahan valssien, pyörien tai telojen välityksellä. Telakoneen paino jakautuu tasan telojen pinta-alalle. Telojen suuren pinta-alan takia koneen aiheuttama pintapaine on pieni ja tiivistysvaikutus vähäinen.

Jyrien valssit synnyttävät maahan kosketuspinnassaan viivapaineen, jonka kasvu merkitsee yhä suurempaa tiivistyvyyttä yhä syvemmällä. Eri konetyypeille on olemassa viivapaineen maksimi, jonka ylittyessä maa alkaa kasaantua jyrän edessä. Jyrien aiheuttama paine kasvaa alustan tiivistymisen mukana, koska valssi ei pääse painumaan tiivistyneeseen alustaan niin paljon kuin

löysään. Ylityskertojen lisääntyessä valssin kosketuspinta pienenee, kosketuspaine kasvaa ja syvyysvaikutus vähenee.

Jyrän valinnassa on kuitenkin kiinnitettävä huomiota myös koneen muihin ominaisuuksiin, sillä jyrien tiivistystekniikan kehittyminen on mahdollistanut entistä kevyempien jyrien käytön.

8.2. Frekvenssin ja amplitudin vaikutus tiivistymiseen

Frekvenssillä eli taajuudella tarkoitetaan jyrän rummun värähdyksiä aikayksikössä ($1/s = \text{Hz}$). Amplitudi puolestaan kuvaa rummun suurinta pystysuoraa liikettä akselitasostaan (m).

Joka maalajilla on oma taajuutensa. Parhaimpaan tiivistämistulokseen päästään, jos tiivistetään tässä tai hieman suuremmassa taajuudessa. Yleensä tiivistettäessä on keskimääräisenä frekvenssinä käytetty 30 Hz. Helposti tiivistettävillä materiaaleilla ohutta kerrosta tiivistettäessä tulisi tärytyksissä käyttää korkeaa frekvenssiä ja matalaa amplitudia.

Matala frekvenssi ja korkea amplitudi sopivat puolestaan paksuille kerroksille ja vaikeasti tiivistettäville materiaaleille. Matalalla frekvenssillä ja korkealla amplitudilla tiivistettäessä kerroksen pintaosa tiivistyy paljon, jolloin tiivistysvaikutus syvemmällä heikkenee.

Hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi olisi lisäksi edullista aloittaa tiivistäminen suurella amplitudilla ja pienentää sitä tiivistymisen edistyessä.

8.3. Jyräysnopeuden vaikutus tiivistymiseen

Jyräysnopeus vaikuttaa dynaamisessa tiivistyksessä ratkaisevasti tiivistymiseen. Nopeuden kasvaessa pinta-alan kohdistuva tiivistysenergia laskee. Suuri nopeus voidaan kuitenkin kompensoida lisäämällä ylitysten määrää.

Dynaamisessa tiivistyksessä etäisyys jokaisen pystysuoran värähdyksen välillä kasvaa nopeuden kasvaessa. Välimatkan kasvaessa tiivistyminen huononee, ja tiivistettävä pinta alkaa aaltoilla. Aaltoilu huonontaa tiivistyksen laatua. Jokaiselle jyrälle on olemassa optimaalinen jyräysnopeus, jolla saavutetaan suurin kapasiteetti ja siten myös alhaisimmat jyräyskustannukset. Maatiivistyksessä sopiva tiivistysnopeus on n. 2-4 km/h.

Erityisen tärkeää tiivistyslaadun tasaisuuden kannalta on pitää jyräysnopeus koko työn ajan mahdollisimman samana.

8.4. Kerrospaksuuden ja ylityskertojen vaikutus tiivistymiseen

Maalaji vaikuttaa kerralla tiivistettävän kerroksen paksuuteen. Hienorakeinen maa vaatii tiivistyäkseen suuremman staattisen paineen kuin karkearakeinen. Siksi ei ajokertojen lisääminen aina riitä, vaan on käytettävä suurempaa jyrää tai ohuempaa kerrosta kuin karkearakeisilla maalajeilla. Myös liikaa jyräystä on vältettävä, sillä siitä seuraa jo tiiviiden kerrosten uudelleen löyhtyminen.

Lopullisesti kerrospaksuus riippuu käytettävän tiivistyskaluston ominaisuuksista. Staattisesti tiivistettäessä saavutetaan suuri tiiveys kerrosten yläosissa, mutta tiivistyksen syvyysvaikutus on vähäinen. Dynaamisilla tiivistyskoneilla on staattisia parempi syvyysvaikutus, joten niillä voidaan tiivistää paksumpia kerroksia ja ylitysten määrää voidaan vähentää. Hienorakeisille maalajeille suunnitelluilla koneilla voidaan tiivistää jopa 0,5 metrin kerrosta. Muuten tiivistettävän kerroksen paksuus vaihtelee välillä 0,1-0,3 m.

8.5. Alustan laadun vaikutus tiivistymiseen

Tiivistettävän kerroksen alustan laadulla on huomattava merkitys tiivistystyössä. Ensiksikin alustan laatu määrää tiivistyksen voimakkuuden. Jos alusrakenne ei tiivistämishetkellä kestä kovaa räsitusta, on tiivistämistehoa vähennettävä vaurioiden estämiseksi. Toisaalta alusrakenteen kantavuuden ollessa heikko häviää tiivistystyön energiasta huomattava osa alusrakenteeseen ja tiivistämistyön määrää on lisättävä.

8.6. Luiskan kaltevuuden vaikutus tiivistymiseen

Erityisesti luiskan tiivistämiseen tarkoitetuissa koneissa tiivistysteho kohdistuu kohtisuoraan tiivistettävää pintaa vastaan. Muissa laitteissa teho suuntautuu alaspäin, ja kallistuskulman voidaan katsoa pienentävän tiivistämistehoa enintään kallistuskulman cosinin neliössä (\cos^2). Uusia teitä rakennettaessa on tilan salliessa pyritty luiskia loiventamaan. Erityisesti ulkoluiskan yläosaa on loivennettu, jotta autot pysyisivät luiskaan joutuessaan pystyssä. Ojan pohja on pyritty tekemään metrin levyiseksi ja pyöristämään juoheasti n. 4 m matkalta.

Taulukko 3. Tien yleisimmät luiskakaltevuudet ja niiden vaikutus jyrän tiivistymisenergian pieneneminen /1/.

Luiskan tyyppi	Kaltevuus	Tiivistystehon pieneneminen (%)
Moottoritie sisäluiskat	1:5	4
Muut tiet sisäluiskat	1:4 (1:3)	6 (10)
Ulkoluiskat	1:2 (1:1,5)	20 (31)

Jotta kone pystyisi toimimaan jatkuvasti kaltevalla luiskalla, tulee koneen moottorin olla paineellisesti voideltu.

Luiskaa tiivistettäessä tiivistäminen aloitetaan aina luiskan alareunasta. Siten vältytään tiivistemateriaalin leviämiseltä ja luiskan kaltevuus säilyy.

8.7. Koetiivistys

Tiivistystyön oikean ja tehokkaan tekemisen varmistamiseksi on hyvä tehdä koetiivistyksiä.

Koetiivistys tehdään käytettävillä maalajeilla ja koneilla, tiivistyspaikkaa vastaavissa oloissa. Koetiivistyksellä voidaan varmistaa maalajin käyttäytyminen tiivistettäessä. Erityisen tärkeää tämä on hienorakeisten maalajien tiivistyksessä.

Koetiivistyksen avulla määritetään tiivistysjärjestys, kastelutarve, kaluston sopivat säädöt sekä tarvittavat ylityskerrat.

9 TIIVISTÄMISEN TYÖKONEET

9.1. Yleistä

Tienrakennuksessa käytettäviä koneita ei juurikaan ole suunniteltu hienorakeisen maalajin tiivistämiseen. Useimmat koneista on lisäksi tarkoitettu tasaisella maalla työskentelyyn tai nousemaan luiskaa kohtisuorasti ylös. Tiensuuntaiseen tiivistämiseen onkin vaikea saada luiskassa toimivaa konetta.

9.2. Kaivukoneet

Kaivukone soveltuu hyvin useimpiin luiskasuojauksen työvaiheisiin. Koneella voidaan muotoilla luiska halutun muotoiseksi, kasata tiivistettävä maa luiskaan ja tiivistää. Markkinoille on tullut myös malleja, joiden ohjaamo voidaan säätää vaakatasoon kaltevilla pinnoilla.

Tela-alustaiset kaivukoneet soveltuvat käytettäväksi huonosti kantavalla maaperällä tai alustalla, joka vahingoittaa helposti kumipyöriä. Telakoneiden siirtonopeus omin avuin on pieni (1,5...3,5 km/h), joten pitkät ja yleisillä teillä tapahtuvat siirrot on tehtävä kuljetusalustalla. Pyöräkoneiden siirtonopeus on tavallisesti noin 20 km/h.

Traktorikaivuri eroaa varsinaisesta kaivukoneesta siten, että siinä ei ole kääntyvää ylävaunua. Kone liikkuu vain pyörillä. Traktorikaivurin teholle ja suuruudelle asettaa rajoituksia yleensä traktorin koko. Myös kaivurin ulottuvuusalue on puomin kääntymiskulman vuoksi pienempi kuin varsinaisilla kaivukoneilla.

Perinteisesti tiivistys tehdään suojausta levitettäessä **kaivukoneen kauhalla** tiivisteiden pintaa painelemalla. Saavutettava tiiviys ei vastaa luiskasuojaukselle asetettuja vaatimuksia, sillä rakenteesta tulee epähomogeeninen ja siihen jää kokonaan tiivistymättömiä kohtia. Materiaalin painelu on kuitenkin paikallaan esitiivistyksenä maata levitettäessä.

Hyvään tiivistystulokseen päästään tiivistettäessä **kaivukoneen puomiin asennettavalla tärylevyllä**. Tärylevyjen ensisijainen käyttökohde onkin maan tiivistäminen, mutta niitä käytetään myös tolppien ja paalujen upotuk-

sen sekä maa-aineksen levittämiseen. Levyt ovat käyttökelpoisia, kun maata tiivistetään rinteillä, kaivannoissa tai ojien pohjilla, jolloin itse tiivistettävässä kohteessa ei voida välttämättä liikkua koneella.

Käytettävän kaivukoneen pitää olla hydraulinen. Tärylevyt liitetään helposti koneen hydraulikkajärjestelmään pikaliittimillä. Tärylevyjen koot vaihtelevat 290 * 580 mm...1180 * 2570 mm ja painot 118 kg...1100 kg. Levyn painon lisäksi kaivukoneen puomin kautta välittyvä koneen paino lisää täryvaikutusta. Levyn paino määrää käytettävän kaivukoneen koon. Pienimmillä tärylevyillä voidaan käyttää noin 1-7 t kaivukoneita tai traktorikaivureita. Suurimmat levyt vaativat yli 13 t kaivukoneen. Luiskasuojauskohteet ovat varsin laajoja, joten suurimmat levyt ovat käyttökelpoisimpia.

Tärylevyllä kerralla tiivistettävä siltti- tai savikerros voi olla paksuudeltaan jopa 0,5 m. Koneen puomilla yletytään useimmissa tapauksissa tiivistämään myös ulkoluiskat. Jatkopuomin käyttö suurissa luiskissa on myös mahdollista, mutta tällöin kaivukoneen on oltava kyllin iso pysyäkseen pystyssä. Jatkopuomin avulla voidaan ylettyä tiivistämään noin 14 m päähän.

Koneen ajaminen luiskaan ja tärytys siellä voi johtaa siihen, että kone lähtee valumaan luiskaa alas. Kaivukoneen mahdollisuudet toimia kaltevilla pinnoilla tulee selvittää ennen työn aloittamista.

9.3. Puskutraktorit

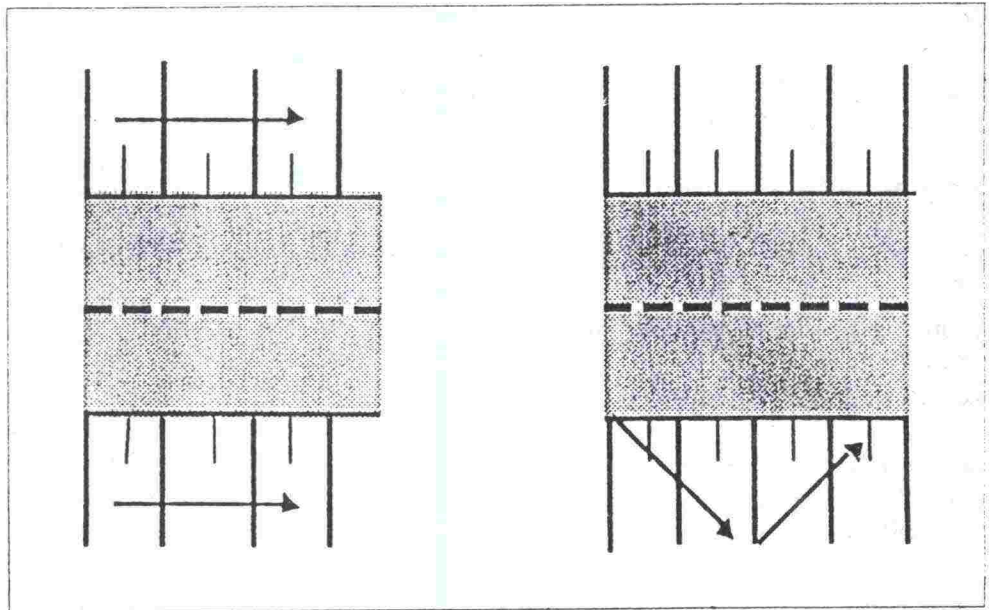
Yleisimmin käytetty puskutraktoryyppi on telapuskutraktori. Traktorin telojen pintapaine on pieni, mikä tekee liikkumisen pehmeällä maapohjalla mahdolliseksi. Suomen tienrakennuksessa käytettävät koneet painavat yleensä 5-10 t.

Telapuskutraktorin maastokelpoisuus ja työntövoima ovat hyviä. Suuri työntövoima johtuu lähinnä hyvästä tartuntakyvystä. Telojen tartuntakerroin kiinteällä maalla on noin 0,9, kun profiilirenkailla saavutetaan vain kerroin 0,5...0,6. Pyöräkoneen etuina ovat puolestaan siirtojen helppous ja suuremmat ajonopeudet.

Puskutraktorilla tasataan lisäksi tien sisä- ja ulkoluiskia. Loivissa luiskissa työ tehdään puskemalla tien pituussuunnassa. Jyrkät ja leveät luiskat tasataan ajamalla koneella luiskaa alas noin 45° kulmassa tien suuntaan nähden.

Ruotsalaisen ohjeen mukaan telapuskutraktoria voidaan käyttää hienorakeisen maalajin tiivistämiseen. Koneen painon pitää silloin olla vähintään 10 t ja tiivistettävän kerroksen vahvuus enintään 200 mm. Ylityskertoja vaaditaan vähintään kuusi. Telapuskutraktori pystyy kulkemaan hyvin luiskassa, ja se voi myös levittää tiivistettävän materiaalin.

Telapuskutraktori olisi käyttökelpoinen tiivistyskone tiivistettäessä loivia luiskia tien suuntaisesti. Erityisesti se saattaisi soveltua moottoriteiden keskikais-tojen tiivistämiseen. Luiskakaltevuuden raja-arvona tiensuuntaisessa työskentelyssä on 1:3. Tällä kaltevuudella pystytään tiivistämään karkeita maala-jeja luiskassa, joten liukkaalla savella tai siltillä ko. rajakaltevuus on hieman pienempi. Jyrkkien luiskien tiivistäminen telapuskutraktorilla on hidasta.



Kuva 8. Tien loivan ja jyrkän sivuluiskan tasaus telapuskutraktorilla /1/.

9.4. Tiivistyskoneet

Tiivistyskoneita ovat:

- sileävalssijyrä
- kumipyöräjyrä
- sorkkajyrä
- erikoisjyrä
- tärylevy
- täryjunta

Luiskatiivistysten laajuuden vuoksi käsikäyttöiset tärylevyt ja täryjuntat ovat tiivistämistyöhön liian pieniä.

9.4.1. Sorkkajyrä

Sorkkajyrällä työskenneltäessä maa tiivistyy sorkkien päihin keskittyvän suuren pintapaineen vaikutuksesta. Sorkat tunkeutuvat tiivistettävään kerrokseen ja tiivistyminen alkaa kerroksen alaosasta. Tiivistämisen edistytessä sorkat painuvat maahan kerta kerralta vähemmän. Pintakerros jää kuitenkin aina löyhäksi, joten sen lopullinen tiivistäminen on tehtävä muilla jyrillä. Epätasaisesta pinnasta on kuitenkin hyötyä siltin päälle levitettävän mullan pysymisen kannalta.

Sorkkajyriä käytetään koheesiomaiden, erityisesti saven, tiivistämiseen. Jyrän tiivistystavan vuoksi materiaalista tulee homogeenistä eikä rakentamiseen jää rajoja eri kerrosten välille.

Erityisten sorkkakoneiden lisäksi sorkat voidaan joissain koneissa kiinnittää myös tavallisten sileiden valssien päälle. Sileävalssisia jyriä voidaan siis käyttää siltin ja sorkkajyriä saven tiivistämiseen. Jatkossa esitettävät jyrätyypit voidaankin muuttaa sorkkajyriksi, jos tiivistettävä materiaali on savea.

9.4.2. Hinattava täryjyrä

Hinattavan jyrän vetämiseen voidaan käyttää esimerkiksi telapuskutraktoria tai vinssiä. Tiensuuntaisesti liikuttaessa ei luiskan kaltevuus saa olla kovin suuri, sillä se asettaa rajoituksia vetävälle koneelle. Loivissa luiskissa on hinattavan jyrän käyttö kuitenkin mahdollista myös tiensuuntaisesti tiivistäessä.

Eritasoliittymien luiskien tiivistäminen on ongelmallista luiskien jyrkkyyden ja pituuden takia. Luiskia voidaan tiivistää jyrää ylös alas vinssin avulla vetämällä. Työtä helpottaa, jos koneita voidaan ohjata kauko-ohjaimella luiskan päältä. Vastaavia koneita ja menetelmää on käytetty erityisesti patoluiskien tiivistämisessä. Tarvittaessa hinattava jyrä voi olla myös sorkkajyrä.

Taulukko 7. Hinattavan täryjyrän painon vaikutus tiivistettävän kerroksen paksuuteen /1/.

Koneen paino (t)	Tiivistettävän kerroksen paksuus (cm)	
	Hk, Sr	Sa, Si
5,9	60	25
6,7 *	60	25
10,5	100	35
16	150	45
16,3 *	150	50

*-merkityssä jyrässä on sorkkavalssi

9.4.3. 2-valssijyrä

Jotta kaksivalssijyrä pystyisi kulkemaan luiskassa, on sen molemmissa valsseissa oltava veto. Tien suuntaisesti koneella voidaan tiivistää enintään noin 1:3 -kaltevia luiskia. Jyrää on koetettu käyttää myös jyrkkien luiskien tiivistämiseen vetämällä jyrää vinssin avulla ylös ja antamalla sen palata itse alas. Menetelmästä saadut tulokset ovat huonoja, sillä jyrää oli vaikea saada pysymään pystyssä.

9.4.4. Kumipyörävetoiset täryvalssijyrät

Kumipyörävetoisella täryvalssijyrällä ei voida hienorakeista maata tiivistäessä kulkea luiskaa ylös, sillä kone kaivautuu maahan. Tiivistämisen tulee siis tapahtua tiensuuntaisesti. Kumipyörä veto parantaa koneen kulkuominaisuuksia.

suuksia, mutta sivukaltevuus tuottaa ongelmia. Luiskan kaltevuus voi olla enintään vain noin 1:3.

Taulukko 9. Kumipyörävetoisen täryvalssiyrän painon vaikutus tiivistettävän kerroksen paksuuteen /1/.

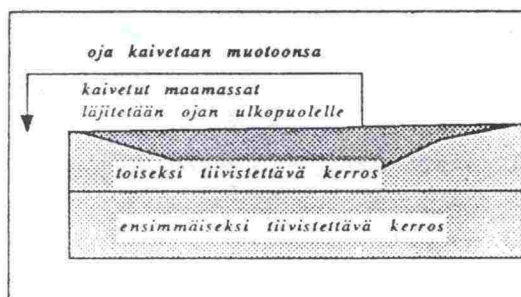
Koneen paino (t)	Tiivistettävän maakerroksen paksuus (cm)	
	Hk, Sr	Sa, Si
5 *	30	15
9,6	50	20
10,9 *	50	30
13,1	70	35
13,7 *	70	35
17,4	100	35
17,8	100	40

*-merkityssä jyrässä on sorkkavalssi

9.5 Tiivistystyökoneen valinta

Työkoneen valinta tiivistämiseen riippuu käytännössä siitä, mitä koneita työmaalla on käytettävissä. Koneiden käyttöä ja soveltuvuutta maatiivistesuojan rakentamiseen tulee selvittää esimerkiksi työmaalla tehtävien koetii-
vistysten avulla (ks. sivu 26).

Kaltevalla pinnalla tiivistäminen voitaisiin välttää myös tekemällä tiivistys kahdessa vaakasuorassa kerroksessa ja kaivamalla tämän jälkeen luiska oikeaan muotoonsa (kuva 9).



Kuva 9. Luiskan tiivistäminen kahdessa vaakasuorassa kerroksessa /1/.

10 SUOJAUSTEN LAADUNVALVONTA

10.1 Suojausten laatu

Suojauksissa on havaittu seuraavia puutteita:

- Maamateriaalista on yleensä määritetty vain rakeisuus.
- Vedenläpäisevyyksiä on yleensä arvioitu vain rakeisuuteen perustuen.
- Luiskasuojausmateriaali on yleensä vain levitetty kaivinkoneella tai puskutraktorilla ja tiivistetty kaivinkoneen kauhalla; luiskantasaus on tehty sitten luiskantasauskoneella.
- Tiivistämisen yhteydessä ei ole valvottu tiivistyksen laatua.

Maamateriaali on lähes kaikissa kohteissa ollut rakeisuudeltaan luiskasuojaukseen sopivaa. Sen sijaan luiskasuojauksen kuivatilavuuspaino on ollut verraten alhainen. Luiskasuojauksen tiivistämättömyys on ilmennyt ajoneuvojen ja koneiden liikkua sen päällä.

Itse rakenteissa havaituista puutteista vakavampia olivat vesieroosion aiheuttamat syöpymisreitit luiskasuojauksessa. Lähes kaikissa kohteissa on havaittu lisäksi kuivumishalkemia, joiden syvyys oli 20 - 30 cm.

Suojauksen laatua tulee valvoa. Laadunvalvonta voidaan jakaa seuraavasti:

- maamateriaalin laadunvalvonta
- tiiviiden valvonta
- suojauksen rakentamisen valvonta.

Luiskasuojaukseen käytettävän materiaalin laatua on valvottava. Materiaalin valintakokeen tulee sisältää rakeisuusmääritykset, maksimikuivatilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden määrityksen parannetulla proctor-kokeella sekä vedenläpäisevyyskokeet laboratoriossa.

Luiskasuojauksen maamateriaalin tiivistymistä valvotaan rakenteen tiiviysasteen avulla. Tiiviysaste määritetään rakenteesta mitatun kuivairtotiheyden ja proctor-kokeesta saadun maksimikuivatilavuuspainon avulla.

Luiskasuojauksen eheys (eroosion jäljiltä) sekä suunnittelussa edellytetyn vedenläpäisevyysarvon pysyvyys tulisi tarkistaa myös valmiissa kohteissa säännöllisin välein (esim. 2 vuoden välein alkukesällä).

10.2. Maamateriaalin laadunvalvonta

Luiskasuojauksessa käytettävän materiaalin laatua tulee valvoa. Laadun selvittäminen aloitetaan samalla, kun inventoidaan tiivistemaanottoaikat ja tekemällä tarvittavat kokeet jo silloin. Materiaalista on saatava selville ainakin rakeisuus, maksimikuivairtotiheys, optimivesipitoisuus, luonnollinen vesipitoisuus sekä vedenläpäisevyys.

Rakeisuudessa tärkeintä on hienon alle 0,074 mm lajitteen määrä (Suojaustarpeen mukaan lajitetta on 50-70%). Hienoaineksen tarkkaan mittaamiseen on käytettävä tavallisen seulonnan lisäksi pesuseulontaa tai areometriä. Alhaisen vedenläpäisevyyden aikaansaamiseksi on materiaalin oltava mahdollisimman tasalaatuista, sillä lajittuneella maalajilla vedenläpäisevyyssominaisuudet saattavat vaihdella suurestikin. Lisäksi käytettävässä maassa ei saa olla hiekkasaarekkeitä, turvetta tai kantoja.

Tutkittavasta materiaalista on lisäksi tehtävä parannettu proctor-koe kuivairtotiheyden maksimin ja optimivesipitoisuuden määrittämiseksi. Materiaalin luonnollinen vesipitoisuus voidaan puolestaan määrittää nopeasti Speedyllä eli karbidometrillä tai kuivatus-punnitusmenetelmällä.

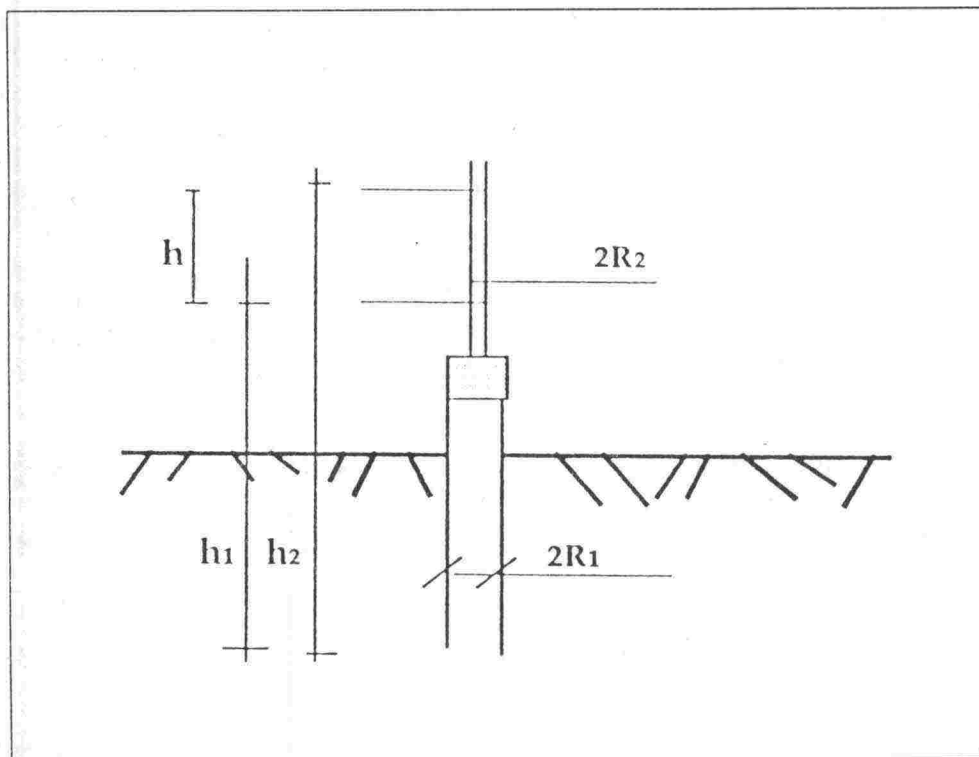
Vedenläpäisevyyden mittaaminen laboratoriossa hienorakeisille maaleille tehdään muuttuva painemenetelmällä. Siltin vedenläpäisevyydeksi laboratoriossa 90 % tiiviudessa tulisi saada vähintään $5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Vedenläpäisevyyden mittaaminen maastossa voidaan tehdä maahan lyödyllä alapäästään avonaisella teräsputkella. Teräsputki lyödään noin 0,4 m syvyyteen. Putkeen kiinnitetään kumikorkin avulla muoviputki, jossa on mitta-asteikko. Putkiyhdistelmään lisätään vettä, kunnes putkessa tapahtuva vedenpinnan alenemisnopeus tasaantuu. Tämän jälkeen havaitaan määrääjän t kuluessa alentuneen vesipatsaan loppukorkeus. Alkukorkeus h_1 pidetään samana kaikissa kokeissa. Vedenläpäisevyyskerroin lasketaan kolmen kokeen keskiarvona seuraavasta kaavasta.

$$k = \frac{2,3 \cdot R_2^2}{4 \cdot t \cdot R_1} \cdot \lg \frac{h_1}{h_2}$$

Jossa k on	maan vedenläpäisevyyskerroin (m/s)
h_1	vesipatsaan alkukorkeus (m)
h_2	vesipatsaan korkeus kokeen lopussa (m)
t	vedenpinnan laskuun tasolta h_1 tasolle h_2 kuluva aika (s)
R_1	teräsputken sisäsäde (m)
R_2	muoviputken sisäsäde (m)

Maastossa tulisi tiivistetyn siltin vedenläpäisevyydeksi saada vähintään $5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Vedenläpäisevyyden mittaamiseen tarvittava laitteisto on huokea, ja koe on helppo tehdä. Menetelmää käytetään yleisesti patojen tiivistyssyöntien vedenläpäisevyyksien mittaamiseen.



Kuva 10. Maastossa vedenläpäisevyyden mittaamiseen tarvittavan laitteiston periaate /1/.

10.3. Tiiviyden laadunvalvonta

10.3.1. Yleistä

Maan irtotiheyden kasvuun perustuvassa menetelmässä verrataan maastossa mitattua kuivairtitiheyttä laboratorioissa proctor-kokeella samasta maa-aineksesta saatuun kuivairtitiheyden maksimiin. Saavutetun irtotiheyden ja maksimikuivairtitiheyden avulla voidaan ilmaista tiiviysaste.

Saatua tiivistysastetta verrataan annettuun tiiviysvaatimukseen. (Jos hienoainespitoisuus on 70 % (60 %), niin tiiviysaste on 85 % (90 %)).

Tiiviyden tarkkailua on tehtävä jokaisesta tiivistettävästä kerroksesta tarpeeksi usein. Tarkkailumenetelmän on oltava mahdollisimman tehokas, jottei se hidasta varsinaista tiivistystä. Tiiviyden mittauksen lisäksi on tiivistämisen aikana tarkkailtava maa-aineksen vesipitoisuutta, sillä väärällä vesipitoisuudella tiivistettäessä on mahdollista, ettei annettuja tiiviysvaatimuksia saavuteta.

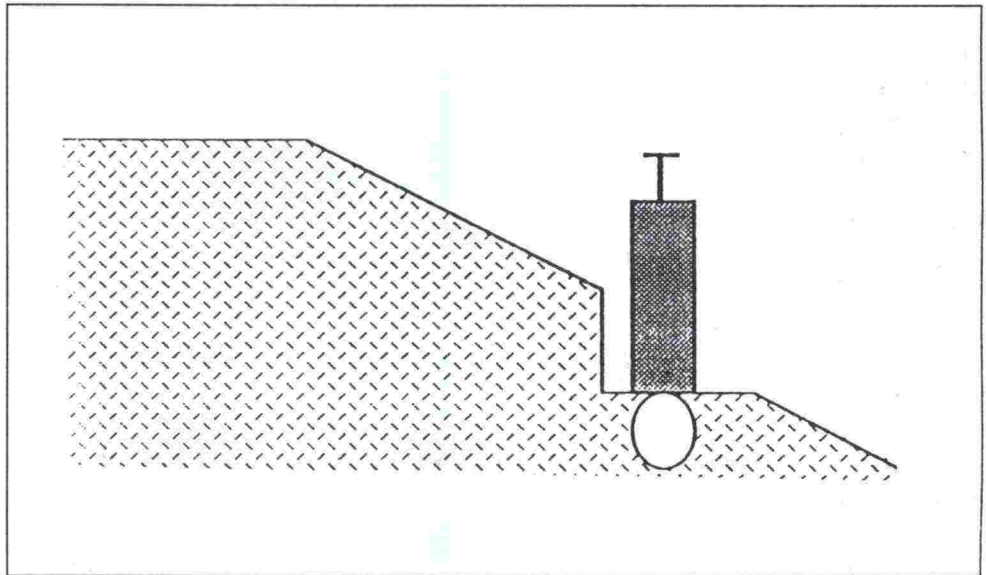
Nykyisin tiiviyttä tarkkaillaan vesivolymetrillä, radiometrisillä laitteilla ja jyrään kiinnitettävillä mittareilla.

10.3.2. Vesivolymetri

Yksinkertaisimmin voidaan kuivairtitiheys mitata maastossa vesivolymetrillä. Maahan tehtävästä kuopasta saatu maamäärä punnitaan ja kuopan tilavuus

mitataan volymetrillä. Kun lisäksi näytteen vesipitoisuus määritetään, voidaan kuivairtoteiheys laskea. Mittaus on helposti työmailla tehtävissä.

Jyrkissä luiskissa mitattaessa voi volymetrin paikalla pitäminen olla vaikeata. Samoin savea tiivistysmateriaalina käytettäessä voi luiskin pinta olla liukas ja aiheuttaa siten ongelmia. Erityisen kaltevia rautateiden pengerlevytyksiä tehtäessä on mittaus liukumisen takia tehty kuvan 10 osoittamalla tavalla.



Kuva 11. Vesivolymetrin käyttö jyrkissä luiskissa /1/.

Vesivolymetrimenetelmän huonona puolena voidaan pitää sen hitautta ja menetelmässä joudutaan myös tiivistetty pinta rikkomaan. Vesivolymetri soveltuu erittäin hyvin pieniin suojauskohteisiin.

10.3.3. Radiometrinen tiiviyden mittaus

Radiometrisellä tiiviydmittarilla voidaan mitata maasta mm. kuiva- ja märkätiheys, vesimäärä, kosteus sekä tiiviyssaste verrattuna proctortiiviyteen. Radiometrisesti tiiviyttä tarkkailtaessa on maasta pitänyt etukäteen määrittää proctor-tiiviyys, joka syötetään koneelle. Eri laitteiden ominaisuudet voivat hieman vaihdella.

Periaatteessa radiometrinen irtotiheyden mittaaminen perustuu siihen, että maa vaimentaa sen läpi kulkevaa säteilyä. Radiometrisiä mittauslaitteita on erilaisia, mutta mittausperiaatteet ovat kaikissa samat. Nykyisin työmailla käytetään yleisesti Troxler- merkistä laitetta.

Maassa muutoin kuin vetenä oleva vety (esim. humus) voi aiheuttaa tulosten vääristymiä.

Anturin avulla saadaan tarvittavat tiedot maaperästä. Anturien tyypit ja niiden mittaussyvytydet ovat seuraavanlaisia:

1. pinta-anturi (syvyysvaikutus <100 mm)
2. lähianturi (syvyysvaikutus 300...600 mm)
3. syvyysanturi (syvyysvaikutus mielivaltainen)

Pinta-anturia lukuunottamatta anturit joudutaan tunkemaan maahan, joten tiivistyskerros rikkoontuu. Menetelmän haittapuolina voidaan pitää kalleutta ja pääosa radiometrisistä laitteista joudutaan kalibroimaan vallitseviin maast ominaisuuksiin sopiviksi. Kalibrointi vie aikaa ja on varsinkin luiskissa hankalaa. Uusimmissa laitteissa maastokalibrointia ei kuitenkaan tarvitse tehdä. Radiometrisiä menetelmiä kannattaa käyttää suurissa tiivistyskohteissa.

10.3.4. Tiiviyn mittaaminen jyrän tiiviysmittarilla

Tiivistystyön tehokkuuden takaamiseksi on tiiviyn mittauksen oltava kyllin nopea. Lisäksi useilla menetelmillä saatava tieto on vain alueen muutamista pisteistä, vaikka tiivistettävä alue voi olla hyvinkin suuri. Koska maaperä on epähomogeenista olisi koko pinnan käsittävä jatkuva mittaus suotavaa.

Maarakennustekniikassa käytetään nykyisin mittausjärjestelmää, jolla valssin tiivistysteho saadaan määritetyksi kiihtyvyyssmittausten avulla. Eri järjestelmät eroavat toisistaan kiihtyvyyssmittareiden lukumäärän ja laadun sekä mittauksien työstämisen suhteen. Myös radiometriseen mittaukseen pohjautuvia laitteita on kehitetty jatkuvaan tiiviyn tarkkailuun sopiviksi. Laitteet ovat liitettävissä suurimpaan osaan jyrästä.

Jatkuvan tiiviyn tarkkailun tulokset voidaan saada numeroina esimerkiksi tiivysasteena tai kuvana piirturille.

Jatkuvan tiivydentarkkailun etu on siinä, että mittauksia voidaan tehdä jatkuvasti ja koko pinnalta särkeä tiivistettyä rakennetta tiivistystyön aikana. Työn lopputuloksesta voidaan päättää nopeasti ja luotettavasti. Tiivistyskertoja ei tule liian vähän. On kuitenkin huomattava, että tiiviyn tarkkailuun käytettävät mittarit eivät reagoi kovinkaan selvästi liikaan tiivistämiseen. Paikalliset huonot kohdat löydetään helposti ja ne voidaan korjata. Virheitä ja kalliilta jälkitöiltä voidaan välttää. Haittana on käytettävien laitteiden kalleus.

Jatkuvaan tiivydentarkkailu sopii niihin luiskasuojauskohteisiin, joissa käytetään jyrä.

10.4. Rakentamisen laadunvalvonta

Luiskasuojausmateriaali voidaan levittää joko tieluiskan päälle tai luiskasta voidaan kaivaa pois suojauksen vaatima tila ennen maamateriaalin levitystä.

Maamateriaalin vesipitoisuuden tulee olla mahdollisimman lähellä optimivesipitoisuutta. Jos maa-aines joudutaan kastelemaan, on kastelu tehtävä ennen maan muotoilua. Näin voidaan välttää muotoilun yhteydessä tapahtuvaa lajitumista ja kastelun aikaista huuhtoutumista.

Rakennepaksuuden tarkkailemiseksi voidaan luiskassa käyttää luiskamallia, jonka avulla maan kaivaminen luiskasta pois on yksinkertaista ja tämän jälkeen materiaalin levitys ja tiivistys oikeaan tasoonsa on helppoa. Luiskan päälle maamateriaalia levitettäessä voidaan apuna käyttää myös erilaisia mittatikkuja. Tiivistekerroksen tarkka paksuus on yksinkertaisinta todeta vaaitsemalla.

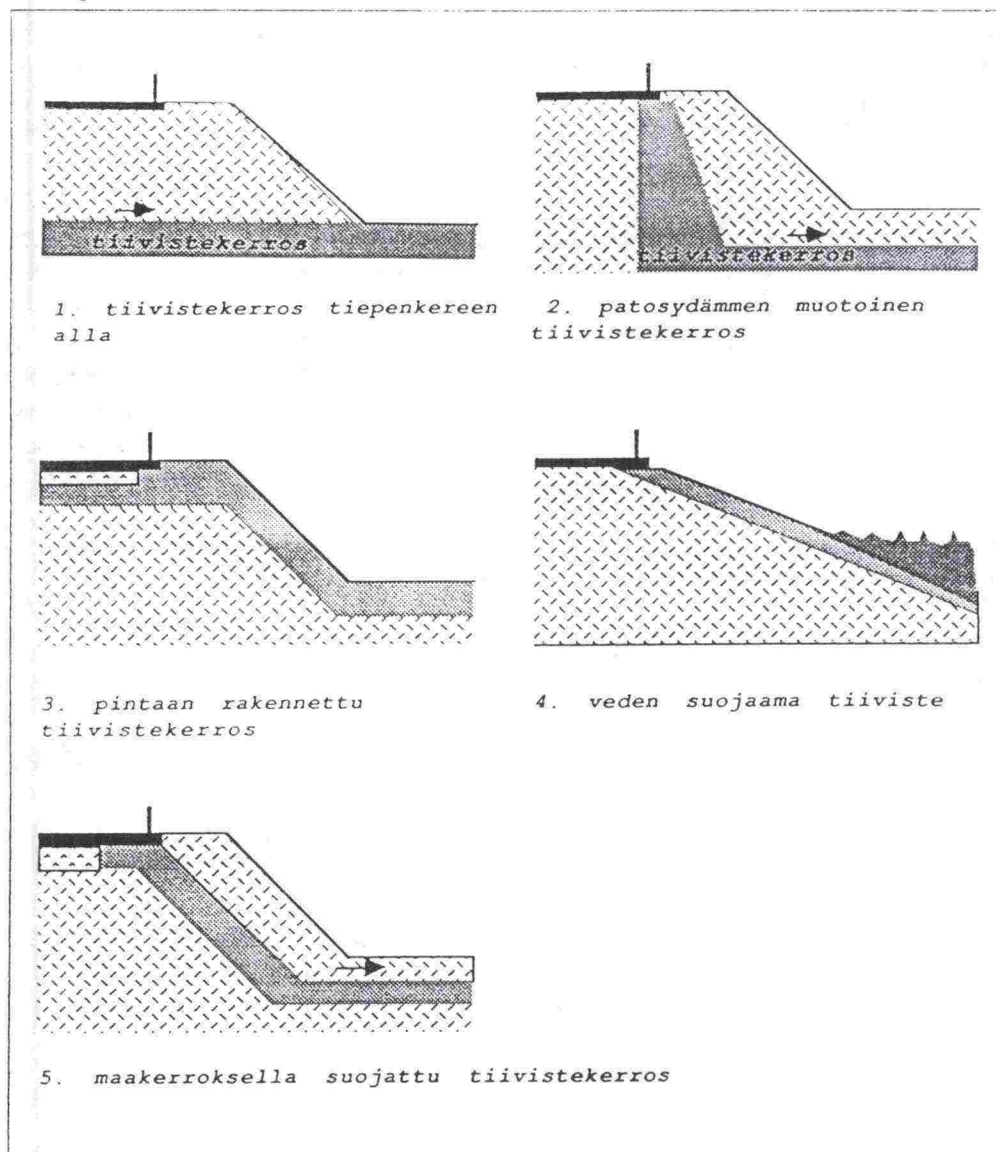
Jyrkkien luiskien kohdalla on syytä kiinnittää huomiota luiskan vakavuuteen. Saksalaisten kokemuksen mukaan luiskat saattavat sortua rankkasateiden jälkeen. Jyrkissä luiskissa olisikin syytä käyttää geomattoja maan ja tiiviste-kerroksen välisen kitkan parantamiseksi.

Tiivistemateriaali on altista sateelle ja sen tiivisteominaisuudet huononevat sään vaikutuksesta. Päivän päätyttyä olisi huolehdittava siitä, että jo paikalleen levitetyt maamassat on tiivistetty. Suojakerros on levitettävä heti tiivistämisen jälkeen ja se on nurmetettava pian, jotta luiska saataisiin sidotuksi. Nurmetuksessa on huomattava, että lannoitetta ei kannata levittää loppukestästä suojattuihin kohteisiin, sillä se ei ehdi vaikuttaa ennen syksyn tuloa. Todennäköisintä onkin, että lannoite valuu sateen mukana vesistöihin. Luiskat, joiden nurmetusta ei ehditä tehdä ennen kasvukauden päättymistä, on parasta suojata valmiilla nurmimatoilla.

Jotta valmiin suojarakenteen rikkoontumiselta välttyttäisiin, on erilaisten kaapeleiden ja johtojen asentajiin oltava yhteydessä ennakkoon. Lisäksi on varmistettava, että kaapeleiden asennuksen jälkeen tiivistemaa tiivistetään riittävän hyvin.

11 POHJAVEDEN SUOJAUKSEN KEHITTÄMISIDEOITA

Suojausrakenteiden suurimmalta ongelmalta - hienorakeisen maalajin tiivistäminen kaltevassa luiskassa - voitaisiin välttyä, jos suojakerros rakennettaisiin tasaisena kerroksena tiepenkereen alle (ks. kuva 12/1). Maatiivistettä ei rakenteessa voi käyttää, sillä penkereen epätasainen painuminen aiheuttaisi painumia tien pintaan. Bentoniittimaton tai muovin levittäminen tasaisella maalla olisi toisaalta helppoa. Veden kerääntyminen penkereen alle voitaisiin estää pienin kallistuksin.



Kuva 12. Erilaisia ideoita pohjaveden suojaukseen /1/.

Suoraan päällysteen alle tuleva suojausrakenne edellyttää mm. riittävää tartuntaa päällysteen ja rakenteen välillä päällystemurtumien estämiseksi.

Luiskarakenteen tiivistäminen on tärkeää suojauksen toimimisen kannalta. Siksi tulisi selvittää mm.:

- eri tärylevymallien tehokkuus ja taloudellisuus
- tärylevyillä tiivistettävien kerrosten paksuus ja tarvittava tärytysaika riittävän tiiviyden saavuttamiseksi
- eri painoisten koneiden ja tärytyslevyjen soveltuvuus jatkopuomin avulla työskentelyyn
- työkonoiden (telapuskutraktori, 2-valssiyrä, täryyrä) kulkuominaisuuden saven ja siltin päällä eri luiskakaltevuuksilla, jotta

saadaan selville turvalliset maksimikaltevuudet tiensuuntaisessa tiivistämisessä

- sopivat, eri työkoneiden painot, tiivistettävän kerroksen paksuus ja ylityskerrat.

Suojausrakenteen lisäksi voidaan yrittää vaikuttaa varsinaisiin pohjaveden pilaajiin, maantiesuolaukseen ja vaarallisten aineiden kuljetuksiin:

- Suolausta voitaisiin välttää merkittävillä pohjavesialueilla kehittämällä vaihtoehtoisia liukkaudentorjuntamenetelmiä
- Säiliöautoille voitaisiin määrätä pohjavesialueilla alhaisemmat sallitut ajonopeudet tai pohjavesialueita välttävät ajoreitit.

LÄHTEET

1. Nina Raitanen: Hienorakeisesta maalajista tieluiskaan tehdyn pohjavesisuojaus- tiivistäminen. Diplomityö TKK, 1991.
2. Pohjaveden suojaus maatiivisteellä tien luiskassa. Tielaitoksen selvityksiä 18/1991.
3. Pohjaveden suojaus tien kohdalla. Tiehallitus, kehittämiskeskus. Helsinki, 1991.

SUOMESSA JA SAKSASSA TOTEUTETTUJA SUOJAUKSIA

1 VALTATIE 5: VUORELA - SIILINJÄRVI

1.1 Yleistä

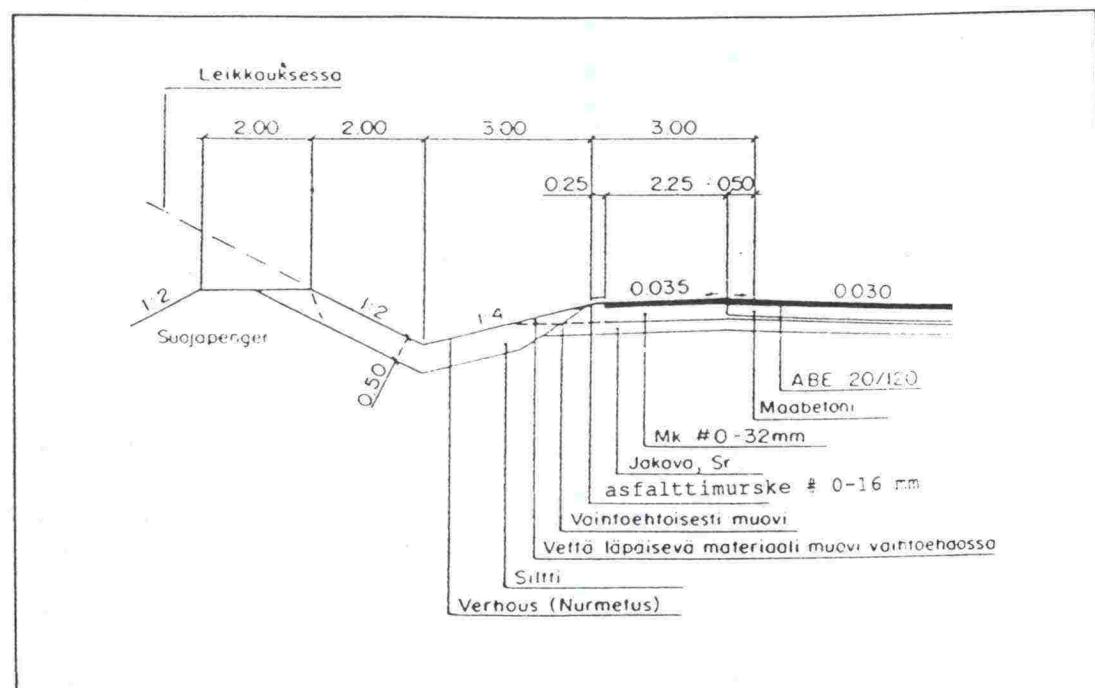
Suunnitellut tielinjaukset ovat Siilinjärven kirkonkylän kohdalla kahdella geologisesti tärkeällä harjualueella. Linjaukset kulkevat lisäksi kahden pohjavedenottamon kaukosuojavyöhykkeellä. Näistä pohjavedenottamoista pumpattava vesimäärä on arviolta noin 3000 m³/d. Rakennettavan tien KVL:n arvioidaan olevan vuonna 2000 noin 14 500. Tiestä yhteensä noin 7 kilometrille rakennettiin pohjavesisuojaus.

1.2 Suojauksen rakenne

Suojausmateriaaliksi valittiin tielinjalta saatava siltti. Valitun siltin vedenläpäisevyys oli pienempi kuin 10⁻⁶ m/s (8,64 cm/h). Siltin päälle tuli kasvualustana toimiva ruokamultakerros, joka estää siltin kuivahalkeilun. Muovisuojaukseen verrattaessa arvioitiin maasuojauksella saavutettavan jopa 6 miljoonan markan säästö.

Suojaukskerroksen paksuutena käytettiin pohjavedenottamon välittömässä läheisyydessä 500 mm ja muualla 350 mm. Paksuuden arvioitiin riittävän estämään suolan pääsy pohjaveteen. Rakenne mitoitettiin pääasiassa säiliöauto-onnettomuuksia vastaan, mutta sen uskottiin samalla suojaavan pohjavesiä suolaantumiselta. Säiliöauto-onnettomuuden sattuessa kerroksen uskottiin pidättävän valuvia myrkyjä kyllin kauan, jotta torjuntakalusto ehtii paikalle. Mitoituksessa otettiin huomioon myös palokunnan läheisyys (n. 2 min). Säiliöautojen oletettiin kaatuvan joko tiellä tai suistuvan ojan pohjalle. Kummassakin tapauksessa öljyn uskotaan valuvan nopeasti pois sisäluisikan yläosasta, joten suojauksen paksuus kapenee kohti luisikan yläosaa.

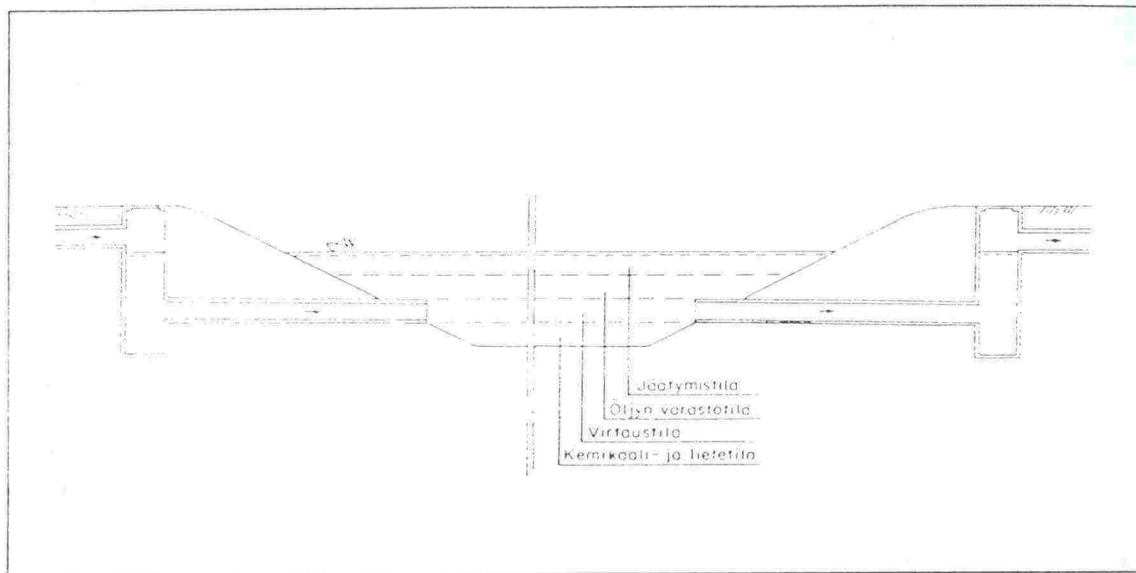
Jyrkimmät eritasoliittymien ramppien luiskat jätettiin suojausta vaille. Säiliöautojen suistuminen luiskaan ajateltiin estettävän kaiteilla.



Kuva L1. Luiskasuojauksen rakenne

Silttisuojaus ulotettiin ulkoluiskassa 2 m ojan pohjalta ylöspäin. Sisäluiska suojattiin kokonaan. Pientareiden pinnoituksessa käytettiin bitumiemulsiota.

Sivuojiin sekä ramppien ja päätien väliselle alueelle tulevat vedet ohjataan ennen vesistöön laskemista öljynerottelualtaisiin. Tarkoituksena on öljyn ja muiden vahingollisten aineiden erottaminen vedestä irtotiheyden erojen perusteella. Erottamisessa kevyet kemikaalit jäävät altaan yläosaan raskaiden laskeutuessa pohjalle. Vesistöön laskettava vesi otetaan altaan keskiosasta. Altaat puhdistetaan pintaroskista ja pohjalietteestä aika ajoin. Vuorela-Siilinjärvi-hankkeessa rakennettiin kolme avonaista maa-allasta ja yksi maahan upotettava betoniallas.



Kuva L2. Öljynerotusaltaan toimintaperiaate ja altaan mitoituksessa käytettävät tilat

1.3 Suojauksen rakentaminen

Luiskasuojauksia rakennettiin sekä ennen että jälkeen tien rakennekerrosten rakentamisen. Tien rakennekerrosten tekemisen jälkeen luiskasta kaivettiin kaivukoneella pois silttisuojauksen vaatima tila. Kaivamisessa käytettiin apuna luiskamallia. Kaivukone levitti siltin ja tiivisti sen kauhan tilalle asennetulla tärylevyllä. Ruokamultakerros pyrittiin levittämään mahdollisimman pian tiivistyksen jälkeen, jotta kuivumishalkeamilta vältytään.

Ennen tien kerrosten tekemistä toimittiin periaatteessa edellä kuvatusti. Suojauksen yläosan viimeistely oli kuitenkin tehtävä kerrosten rakentamisen jälkeen, joten työmäärä lisääntyi.

1.4 Tiivistys

Tiivistys tehtiin kaivukoneeseen asennettavalla hydraulisella tärylevyllä. Tärylevyn paino oli 1000 kg ja levyn mitat ovat 1100 * 1400 mm. Siilinjärvellä käytetyn kaivukoneen paino oli 19 t.

Tärylevyllä tiivistettiin koko 0,5 m kerros yhdellä kerralla. Silttiä tiivistettäessä eiongelmia tullut, mutta maalajin savipitoisuuden kasvaessa savi pyrki tarttumaan tärylevyyn. Tarkoituksena on

vielä kokeilla tiivistämistä ruokamullan päältä, jolloin mullan ja siltin välinen tartunta paranisi. Siltin tiiveys saattaisi tosin hieman huonontua.

Koko 7 kilometrin pituisen suojauksen tiivistystyö tehtiin yhdellä tärylevyllä varustetulla koneella, jonka kapasiteetin katsottiin olevan riittävä. Kone pystyi tiivistämään $150 \text{ m}^2/\text{h}$, jolloin tiivistämiskustannuksiksi saatiin $2 \text{ mk}/\text{m}^2$.

Tiiviyyttä ei tarkkailtu. Käytetyn tiivistysmenetelmän katsottiin olevan paras käytettävissä oleva tiivistystapa. Tiiviyyttä ei siis kannattanut mitata, koska parempaan tiiviyteen ei kuitenkaan voitaisi päästä.

1.5 Kritiikkiä

Työmaalla esitettiin kritiikkiä tielaitoksen pohjavedensuojausohjetta kohtaan.

Ohjeet ovat ylimitoitettut. Kerrospaksuuksia mitoitettaessa käytetty 300 mm korkuinen maanäytettä kuormittava vesipatsas esiintyy todellisuudessa hyvin harvoin. Esimerkiksi säiliöauto-onnettomuudessa aineet valuvat nopeasti laajalle alueelle ja maata kuormittava öljypatsas pienenee muutama cm.

Koska suojakerrospaksuudet on esitetty tielaitoksen ohjeessa, on vaarana, että niitä pidetään mitoituksen minimeinä. Silloin mitoitetaan reilusti yli ja kustannukset nousevat. Suojattaessa pääasiassa öljyvahinkoja vastaan olisi kerrospaksuutta valittaessa otettava erikseen huomioon mm. paloaseman läheisyys.

2 VALTATIE 3, HATTELMALAN ERITASOLIITTYMÄ

2.1 Yleistä

Suojauskohteena oli Hattelmalan eritasoliittymä, joka sijaitsee aivan Kylmälahden vedenottamon välittömässä läheisyydessä. Alueen maaperä on hyvin vettä johtavaa soraa ja paikoittain silttiä.

2.2 Suojauksen rakenne

Suojauksessa käytettiin sekä **maatäytettä että bentoniittimattoa**. Bentonittimatolla suojattiin pohjavedenottamon lähialueet ja sillan alustat, koska maatäytteen levitys sillan alle olisi ollut hankalaa. Alueella oli myös paksuja silttikerroksia, joiden katsottiin toimivan luonnonmukaisina suojina, joten näitä alueita ei muutoin suojattu.

Suojausmateriaalina käytettiin pääasiassa tien leikkauksista saatua **savista silttiä ja silttiä**. Käytetty siltti tutkittettiin TKK:lla ja sen todettiin täyttävän vaatimukset. Työmaalla kritisoitiin siltin laatuvaatimusten esittämistä suunnitelmissa vedenläpäisevyyskertoimen muodossa, sillä kertoimen määrittäminen oli työmaalla mahdotonta. Rakeisuuskäyrän muodossa esitetyt vaatimukset olisivat työmailla tarkastettavissa, joten niitä myös paremmin noudatettaisiin.

Bentoniittimatossa on kuitukankaiden välissä aktivoitua bentoniittisavea, joka turpoaa jouduttuaan kosketuksiin maan veden kanssa. Maton etuna voidaan pitää sitä, että se paikkaa syntyneet reiät itsestään ja sen veden ja kemikaalien läpäisevyys on erittäin huono ($5 \cdot 10^{-11}$ m/s = 6,0 cm/4d).

Maton levittäminen luiskaan oli vaivatonta, sillä matto pysyy kitkansa ansiosta hyvin luiskassa ja maton päälle levitetty maamassa ei lähde luisumaan alas. Bentoniittimatto on kuitenkin kallista, joten sen käyttö rajoittui vain pieniin kohteisiin. Hattelmalassa käytetty bentoniittimatto oli Algol Oy:n maahantuomaa Bentofixiä.

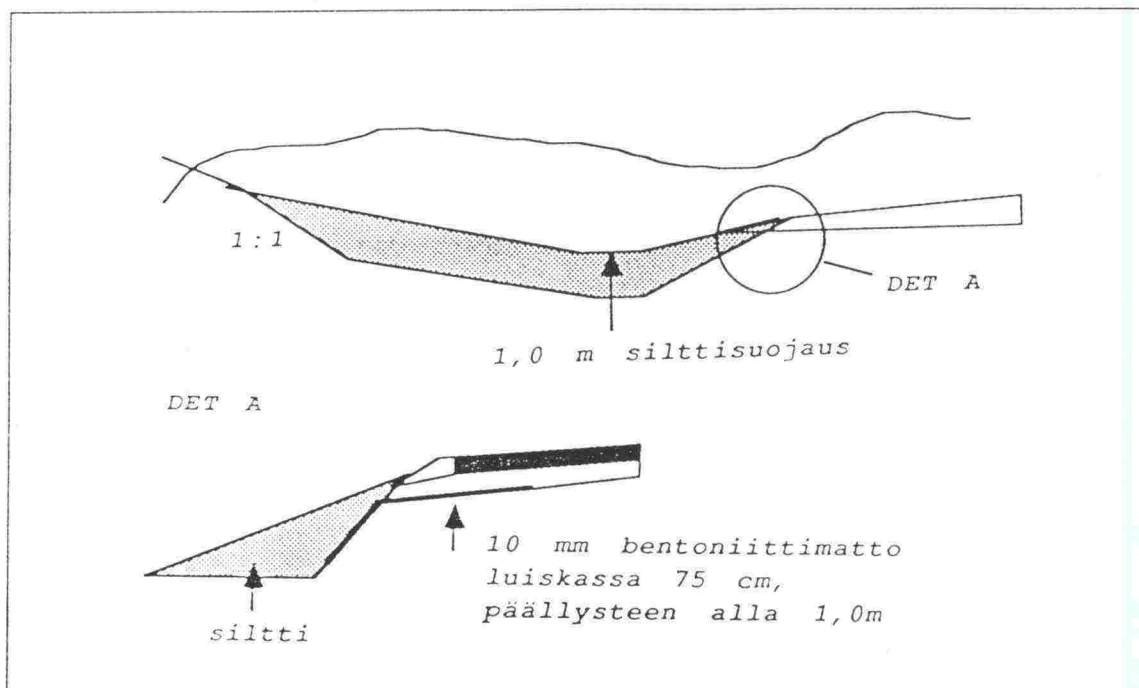
Täyttökerroksen paksuus oli sivuojan pohjalla vähintään 1 m. Kerrospaksuuden valinnassa ei ollut mitään erityisiä kriteereitä, vaan sen arveltiin olevan ainakin riittävä. Maasuojauksessa asfaltin reunalta valuvan veden pääsy rakenteeseen ja pohjamaahan estettiin asentamalla kantavan kerroksen alle bentoniittimatto vähintään 1 m leveydelle ja edelleen 0,75 m matkalle luiskaan.

Lopuksi luiskaan levitettiin multaa ja se nurmetettiin.

Suojaukselta valuva vesi johdetaan sivuojia pitkin alueelta pois virtaavaan ojaan. Ojan virtausnopeus on hidas ja veden oletetaan viipyvän siinä noin 2 tuntia. Tämänajan uskotaan riittävän veden puhdistumiselle ja onnettomuuden sattuessa öljyntorjuntaan. Ojan virtausta ei voida katkaista.

2.3 Suojauksen rakentaminen

Siltti levitettiin ulkoluiskiin ennen tien kerrosten rakentamista. Sisäluiskaan massa levitettiin kerrosten valmistuttua, mutta yläosa viimeisteltiin vasta päällystämisen jälkeen.



Kuva L3. Luiskasuojauksen rakenne

Työselityksessä massan levitys ja tiivistys määrättiin tehtäviksi 10 t telapuskutraktorilla 0,35 m kerroksissa. Todellisuudessa levityksen ja tiivistyksen teki kaivukone. Suojaus levitettiin 1 m kerroksena ja tiivistettiin kaivunkoneen kauhalla painelemalla. Tiiveydentarkkailua ei tehty.

3 VALTATIE 4, OULU-KEMPELE

3.1 Yleistä

Oulun ja Kempeleen välinen tie rakennettiin 1986-1990. Tie kulkee Kempeleenharjun pohjavesialueella, ja Pohjois-Suomen vesioikeuden päätöksellä tien luiskat jouduttiin suojaamaan. Pohjavesi on suojausalueella noin 1 m syvyydellä maan pinnasta. Pohjavedenottamon vedenottosyvyys on kuitenkin noin 18...20 m. Maassa 5 m syvyydessä oleva tiivis silttikerros toimii osaltaan pohjavesisuojauksena.

3.2 Suojauksen rakenne

Tiealue oli jaettu suojaustarpeen mukaan kahteen osaan. Suojausteknisesti helpomman alueen suojaukseen käytettiin ainoastaan silttiä. Vaativammassa suojauksessa suojattiin siltin lisäksi myös muovilla.

Siltin rakeisuusvaatimuksena oli noin 70 % alle 0,074 mm lajitetta.

Muovisuojauksen muovin suunniteltu vahvuus oli 2 mm, mutta kustannussyistä käytettiin 1 mm muovia. Suojattaessa muovin alle laitettiin tasaushiekkakerros. Muovi levitettiin sisä- ja ulkoluiskaan. Sisäluiskassa muovi jätettiin tien rakenteessa suodatinkerroksen sisään. Suojaus ulotettiin puoleen väliin kaistaa. Muovin päälle laitettiin noin 0,3 m silttiä, jonka pysyminen luiskassa varmistettiin kuitukankaalla. Lopuksi rakenteen päälle tuli nurmetettava suojakerros mullasta. Siltin avulla muovisuojausrakenteeseen saatiin tarpeeksi paljon maamassaa. Onnettomuuden sattuessa vaaralliset aineet imeytyvät silttiin, joka voidaan poistaa muovin jäädessä vahingoittumattomana paikalleen.

Luiskasuojauksilta vedet johdetaan **öljynerotusaltaisiin**. Kaikki kolme allasta olivat rakenteeltaan samanlaisia.

Altaiden luiskakaltevuuksien ollessa jyrkempiä kuin 1:1,5 ei silttiä saatu pysymään liukkaan luiskan päällä. Muovin päälle oli asennettu kennosto, jonka välit täytettiin siltillä. Kennostojen pysyminen luiskassa oli varmistettu luiskan päälle ankkuroidulla metalliverkolla.

Vesi johdetaan keruuojusta altaaseen tulokaivon kautta. Altaasta vesi juoksee lähtökaivon, jossa on virtaamaa hidastava syöksykaivo, kautta laskuojaan ja sitä kautta vesistöön. Virtausta hidastamalla öljy saadaan nousemaan altaan pintaan, josta se voidaan kerätä pois. Altaat ovat salaojitetut muovin ulkopuolelta. Salaojat säätelevät allasta ympäröivää pohjavettä. Jos pohjavesi nousee altaan ulkopuolella, padotusventtiili laskee vettä altaan sisäpuolelle. Näin altaan vedenpinta saadaan pysymään ulkopuolisen vedenpinnan kanssa samassa tasossa. Yhden altaan kohdalla noin 150 mm ero vesipinnoissa aiheutti altaan sortumisen.

3.3 Suojauksen rakentaminen

Suojaus rakennettiin tien kerrosten rakentamisen yhteydessä. Rakennusvaiheessa jouduttiin liikkumaan puolivalmiin tiepenkereen päällä. Tämä aiheutti ongelmia monille koneille. Materiaalit levitettiin kaivukoneella eikä tiivistystä tehty.

Muovin levitys oli hankalaa. Juuri levitetyn muovin alle pyrki lisäksi kertymään vettä. Muovin saumaus tehtiin englantilaisella saumauskoneella. Oulussa saumaustyöstä vastasivat englantilaiset, mutta nykyisin ko. laite on myös Suomessa Algol Oy:llä.

Luiskien vakavuus aiheutti ongelmia erityisesti jyrkkien allasluiskien kohdalla.

4 VALTATIE 3, KEIMOLA-KARHUNKORPI-USMI

4.1 Yleistä

Alueen tie kulkee kahden kunnallisen vedenottamon lähellä. Pääosin tie on kaukosuoja- mutta myös pieneltä osin lähisuojavyöhykkeellä. Suojattavia tiekilometrejä oli noin 4.

4.2 Suojauksen rakenne

Välillä Keimola-Karhunkorpi suojaus tehtiin noin 0,8 m silttikerroksesta. Siltin laatu todettiin silmämääräisesti.

Suojattavan luiskan yläosan tiivistämisessä kokeiltiin useita eri vaihtoehtoja, jotta niiden keskinäinen paremmuus saataisiin tulevaisuutta varten selville.

Vt 3:n betonitieosuudella laitettiin luiskan yläosassa soratien kulutuskerrosmurskeen alle bitumoitu suodatinkangas. Muualla luiskan yläosa suojattiin joko ruiskuttamalla bitumia reunamurskeen päälle tai asfaltoimalla piennar ja 0,3 m luiskaa.

Siltti levitettiin n. 12 t telapuskutraktorilla. Koneella kyettiin liikkumaan 1:3 loivemmissa luiskissa. Luiskat viimeisteltiin luiskantasauskoneella. Suojausalueelta vedet johdetaan Vantaanjokeen.

Välillä Keimola-Usmi töitä ei oltu vielä aloitettu, mutta rakenne tulee olemaan tielaitoksen ohjeen mukainen. Tiivistämisen tekotapaa ei ole vielä mietitty.

5 MAANTIE 137 (TUUSULANTIE)

5.1 Yleistä

Suojattava kohde on aivan pohjavedenottamon kaukosuojavyöhykkeen rajalla. Vuonna 1991 tietä suojataan noin 400 m (1700 m²) ja vuonna 1992 suojattavan osuuden pituus on noin 1000 m (13 000 m²).

5.2 Suojauksen rakenne

Suojauksessa käytettiin noin 0,5...1,0 m savi/ siltti- kerrosta, jonka kaivukone paineli paikoilleen. Luiskan yläosaan, murskeen alle, asennettiin bentoniittimatto. Bentoniittimattoja oli kahta erilaista tyyppiä, jotta niiden ominaisuuksia voitaisiin vertailla.

Kaitoksen Claymax-bentoniittimatto oli matoista kalliimpi (48 mk/m²). Maton ylä- jaalakangasta ei oltu tikattu yhteen. Ylä- ja alakangas luistivat päällystämisen aikana toistensa suhteen. Claymax-mattoa asennettaessa voitiin jatkoskohdissa matot asettaa limittäin ja erillistä bentoniittijauhetta ei saumoissa tarvittu.

Algolin Bentofix (45 mk/m²) oli puolestaan läpiommeltu ja saumauksessa jouduttiin käyttämään bentoniittijauhetta.

Käytetyt bentoniittimatto- rullat olivat eri mittaisia, ja Bentofix- rullan puolikas sopi Mt 137 luiskaan mainiosti. Claymaxista jäi puolestaan hukkapaloja. Ensi vuonna suojausta jatketaan Bentofixillä.

6 POHJAVESISUOJAUS SAKSASSA

6.1 Yleistä

Saksalaiset havahtuivat suojelemaan pohjavettä 1960-luvulla Münchenin lähellä tapahtuneen vakavan säiliöauto-onnettomuuden jälkeen. Pohjavedensuojelun päämääränä on suojella pohjavettä saastumiselta ja samalla edesauttaa sadeveden tehokasta imeytymistä pohjavedeksi.

Saksalainen pohjavesialueiden vyöhykejako on samanlainen kuin Suomessa. Alueiden rajoitukset ovat kuitenkin huomattavasti Suomen vaatimuksia tiukempia.

Pohjavedenottamon alueelle ei yleensä rakenneta teitä. Jos tie joudutaan alueelle kuitenkin rakentamaan, ei pohjavedenottamoa saa enää käyttää.

Lähisuojavyyhyke pyritään myös rauhoittamaan tien rakentamiselta. Pakottavista taloudellisista syistä tie voidaan lähisuojavyyhykkeelle tehdä. Lähisuojavyyhykkeelle rakennettu tie ei saa koskaan olla alueen ainut liikenneväylä. Tien tulee lisäksi olla liikennevalo-ohjattu, eikä sillä saa olla liittymiä, huoltoasemia tai pysäköintipaikkoja. Lisäksi luiskasuojaus on tehtävä ja tiellä on oltava kaiteet.

Kaukosuojavyyhykkeellä rajoitukset ovat lievemmat, mutta myös tällä alueella on vältettävä huoltoasemia, levähdyspaikkoja ja liittymiä.

6.2 Suojauksen rakenne

Maamateriaalin laatuvaatimukset ovat seuraavat:

Joko rakeisuus toteuttaa seuraavat ehdot:

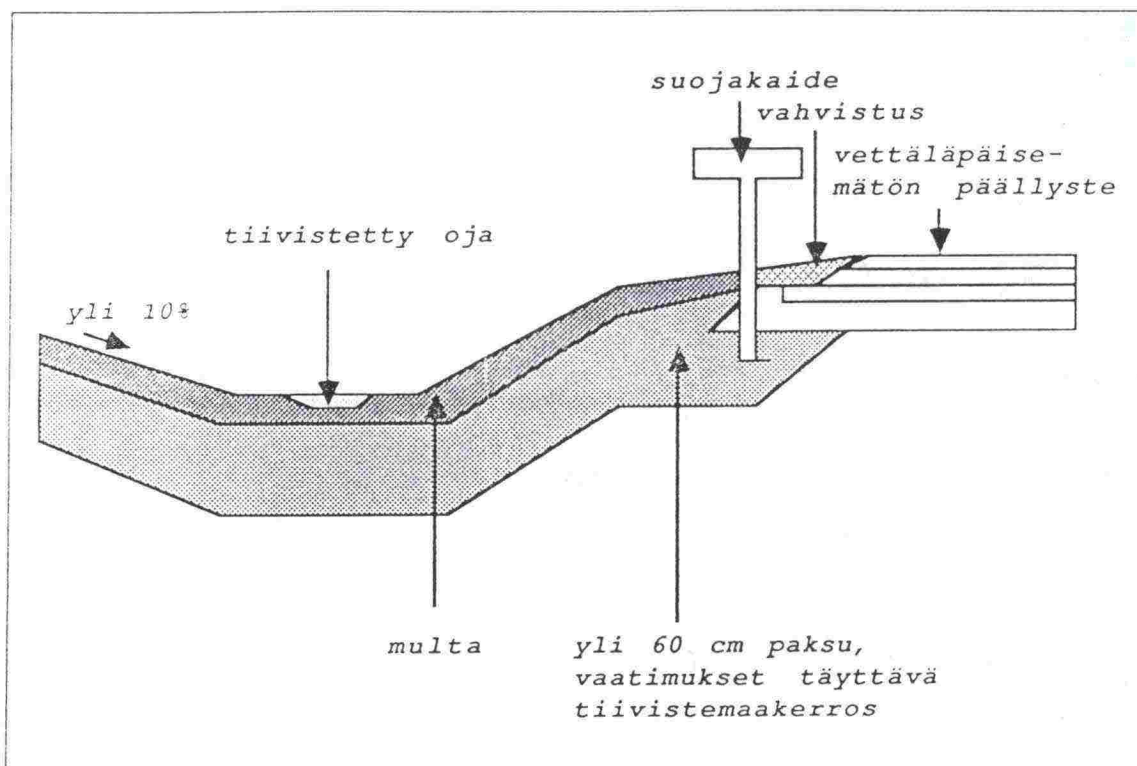
- < 0,02 mm rakeita on vähintään 15 painoprosenttia ja
- < 0,06 mm rakeita on vähintään 20 painoprosenttia

Tai vedenläpäisevyys on 10^{-7} m/s (8,6 mm/d)

Lisäksi suositellaan Proctor-kokeen tekemistä kuivairtoteiheyden maksimin ja optimivesipitoisuuden määrittämiseksi.

Saksassa on kokeiltu luiskasuojaukseen kuvan 12 (tekstissä s.34) kaltaisia rakenteita. Parhaimmiksi rakenteiksi osoittautuivat 2 ja 3, joissa suojakerros peittää tiivistekerrosta. Lisäksi veden peittämistä suojakerroksesta on hyviä kokemuksia. Luiskassa pyritään 1:4 kaltevuuteen, mutta sen rakentaminen on usein mahdotonta tilanpuutteen vuoksi. Yleisin kaltevuus onkin 1:1,5. Luiskan jyrkkyys aiheuttaa vakavuusongelmia. Usein rakenteet sortuvat rankkasateen jälkeen, ja tiivistekerroksen alla joudutaan käyttämään geomattoja kitkan parantamiseksi.

Kuvassa L4 esitetään tarkemmin yleisimmin käytetty rakenne. Huomattavaa on, että rakenteeseen kuuluu aina kaide.

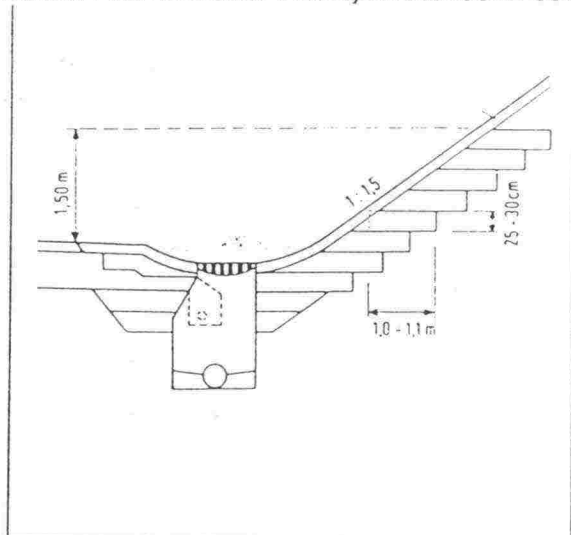


Kuva L4. Suojauksen rakenne (pengeri, lähisuojavaiohyke)

6.3 Tiivistäminen

Tiivistettävä kerros on 0,6 m ja se tiivistetään vähintään kahdessa kerroksessa. Maamassa kasataan luiskaan pyöräkuormaajan avulla.

Pääsääntöisesti tiivistäminen tehdään luiskaan kasatun maamassan päältä, mutta hyvin jyrkissä luiskissa, joissa vakavuusongelmat ovat mahdollisia, tiivistäminen voidaan tehdä kuvan L5 mukaan kerroksissa. Tiivistysmateriaalin esitiivistys tehdään pyöräkuormaajan kauhalla.



Kuva L5. Jyrkän luiskan tiivistäminen kerroksittain

Varsinainen tiivistys tapahtuu 1:1,5 luiskissa sorkka- tai sileävalssijyrällä luiskaa kohtisuorasti ylös-alas ajamalla.

Jyrkemmissä luiskissa näiden jyrrien käyttö on mahdotonta, joten tiivistys tehdään luiskan päälle sijoitetun vinssin avulla ylös vedettävällä jyrällä.

7 YHTEENVETO SUOJAUSKOHTEISTA

Tehdyissä luiskasuojauksissa suojauksen rakenne vaihteli. Pääosassa suojauksista oli käytetty silttiä. Suurimmat eroavaisuudet olivat luiskan yläosan tiivistämisessä. Yläosassa oli joko pelkkä silttikerros tai siihen oli lisätiivistykseksi laitettu:

- bitumia
- asfalttia/ asfalttibetonia
- muovia
- bentoniittia
- bituminoitua kuitukangasta

Lisäksi silttiä käytettiin koko luiskaa suojattaessa yhdessä bentoniitin tai muovin kanssa. Eri suojausvaihtoehtojen keskinäisestä paremmuudesta ei ole tietoa, mutta suojauskustannukset vaihtelivat paljon. Bentoniittimatto oli selvästi kallein.

Pelkällä siltillä suojattaessa käytetyt tiivistysmenetelmät olivat:

- kaivukoneeseen asennettava tärylevy
- telapuskutraktori
- kaivukoneen kauhalla painelu

Pääosassa kohteista ei tiivistämiseen kiinnitetty huomiota. Yhdelläkään työmaalla ei tiiviyttä tarkkailtu jälkeempään.

Osassa suojauskohteista käytettiin veden puhdistamiseen erilaisia altaita. Toinenvaihtoehto oli johtaa tieltä tuleva vesi pois suojausalueelta. Tätä ei voida pitää kokonaisvaltaisena ympäristönsuojeluna.

Saksalaisten pohjavesisuojaukset ovat rakenteeltaan suomalaisten kaltaisia. Pohjaveden suojausvaatimukset ovat kuitenkin huomattavasti suomalaisia vaatimuksia tiukempia.

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 4/1992 Ohituskaistatiekokeilu valtatiellä 4 välillä Järvenpää-Mäntsälä. TIEL 3200060
- 5/1992 Tieverkon tuottamat läheisyyspalvelut. TIEL 3200061
- 6/1992 Talvihoidon päivystysjärjestelmä. TIEL 3200062
- 7/1992 Moottoriväylien kansantaloudelliset vaikutukset. TIEL 3200063
- 8/1992 Yhteenveto TTS:n 1992 - 95 hankeperusteluista. TIEL 3200064
- 9/1992 Motorledernas nationalekonomiska effekter. TIEL 3200065R
- 10/1992 Kehittämishankkeet tielaitoksen tuloksenteossa. TIEL 3200066
- 11/1992 REA-menetelmä; työnsuunnittelu- ja valvontamenettely. TIEL 3200067
- 12/1992 Moottoriliikennetien liikennevirran ominaisuudet. TIEL 3200068
- 13/1992 Aloitetoiminta johtamisen ja kehittämisen apuna; kirjallisuuskatsaus ja pohdinta tielaitoksen näkökulmasta. TIEL 3200069
- 14/1992 Tielaitoksen tukikohtaverkko. TIEL 3200070
- 15/1992 Pricing of Traffic Noise and Exhaust Gases in Road Planning. TIEL 3200071E
- 16/1992 Prissättning av avgaser och buller vid vägplanering. TIEL 3200072R
- 17/1992 Tienpitokoneisiin liittyvät keksinnöt. TIEL 3200073
- 18/1992 Tietullien tekniset järjestelmät. TIEL 3200074
- 19/1992 Mätning av underhållets resultat. TIEL 3200075R
- 20/1992 1980-luvulla toteutettuja taajamateitä; taajamakuva- ja toimivuustarkastelu. TIEL 3200076
- 21/1992 The Effects of Motorways on the National Economy. TIEL 3200077E
- 22/1992 Quality Requirements of Prefabricated Strip Drains; Quality Control and Test Methods. TIEL 3200057E
- 23/1992 Sairaalahoittoa vaatineet loukkaantumiset liikennealueilla Suomessa vuonna 1989. TIEL 3200078
- 24/1992 Liikenne ja maankäyttö, esiselvitys. TIEL 3200079
- 25/1992 Liikenteen profiili. TIEL 3200080
- 26/1992 Tiehankkeiden yhteiskuntataloudellisen vaikutukset. TIEL 3200081
- 27/1992 Yleisten teiden liikennemelu, otantaselvitys, TIEL 3200082
- 28/1992 Tien suuntauksen suunnittelu. TIEL 3200083
- 29/1992 Onnettomuudet pääteiden tasoliittymissä. TIEL 3200084
- 30/1992 Jätkäkynttilä. TIEL 3200085